

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VINICIUS COSTA CYSNEIROS

EFEITOS DOS FATORES AMBIENTAIS NA ALOMETRIA DAS ÁRVORES EM
DIFERENTES TIPOLOGIAS FLORESTAIS DA MATA ATLÂNTICA NO ESTADO DO
RIO DE JANEIRO

CURITIBA

2020

VINICIUS COSTA CYSNEIROS

EFEITOS DOS FATORES AMBIENTAIS NA ALOMETRIA DAS ÁRVORES EM
DIFERENTES TIPOLOGIAS FLORESTAIS DA MATA ATLÂNTICA NO ESTADO DO
RIO DE JANEIRO

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Florestal, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado

Coorientadores: Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari
Prof. Dr. Daniel Costa de Carvalho

CURITIBA

2020

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Cysneiros, Vinicius Costa

Efeitos dos fatores ambientais na alometria das árvores para diferentes tipologias florestais do estado do Rio de Janeiro / Vinicius Costa Cysneiros. - Curitiba, 2020.

122 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado

Coorientadores: Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari

Prof. Dr. Daniel Costa de Carvalho

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

Defesa: Curitiba, 26/10/2020.

Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Florestas - Modelos matemáticos - Rio de Janeiro (Estado). 2. Dendrometria. 3. Florestas - Medição. 4. Equações. 5. Florestas - Aspectos ambientais. 6. Teses. I. Machado, Sebastião do Amaral. II. Pelissari, Allan Libanio. III. Carvalho, Daniel Costa de. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.51(815.3)

Bibliotecária: Berenice Rodrigues Ferreira – CRB 9/1160



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
FLORESTAL - 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **VINICIUS COSTA CYSNEIROS** intitulada: **EFEITOS DOS FATORES AMBIENTAIS NA ALOMETRIA DAS ÁRVORES PARA AS DIFERENTES TIPOLOGIAS FLORESTAIS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO**, sob orientação do Prof. Dr. SEBASTIÃO DO AMARAL MACHADO, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 26 de Outubro de 2020.

Assinatura Eletrônica

28/10/2020 10:05:10.0

SEBASTIÃO DO AMARAL MACHADO
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

27/10/2020 09:19:25.0

ALEXANDRE BEHLING

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

26/10/2020 21:09:21.0

THIAGO FLORIANI STEPKA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA)

Assinatura Eletrônica

27/10/2020 09:03:21.0

SAULO JORGE TÊO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DO OESTE DE SANTA CATARINA)

Assinatura Eletrônica

27/10/2020 09:53:19.0

EDER PEREIRA MIGUEL

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA)

Avenida Lothário Meissner, 632 - CURITIBA - Paraná - Brasil
CEP 80210-170 - Tel: (41) 3360-4212 - E-mail: pgfloresta@gmail.com

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 57625

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 57625

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus Pai Soberano e Onipotente, pelo dom da vida e por todas benções e graças recebidas, na vida material e espiritual.

Com muito carinho agradeço a minha esposa Ana Luiza de Rosa Castro, por toda força e compressão, nesse período acadêmico e em toda vida juntos.

A toda minha família, pelo apoio incondicional em todas as fases de minha vida. Em especial aos meus pais José e Olinea, aos irmãos Rafael e Natália e a tia Lyz.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado, por toda ajuda e suporte fornecidos durante a Pós-graduação. Também agradeço pela paciência e compreensão durante este período.

Ao amigo e Coorientador Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari, pela imensa ajuda na elaboração da Tese e análise dos dados. Também agradeço por todas conversas criativas e científicas que tivemos.

A grande amiga Tatiana Dias Gai, que tornou possível o desenvolvimento da Tese.

Ao amigo e Coorientador Prof. Dr. Daniel Costa de Carvalho, pela constante ajuda e colaboração.

Ao Prof. Dr. Luan Demarco Fiorentin e ao Msc. Gabriel Agostini Orso pelo suporte com as análises estatísticas e modelagens.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa fornecida (Processo: 140594/2017-5).

Agradeço a Fundação Flora de Apoio a Botânica, a Secretaria Estadual do Ambiente (SEA-RJ) e ao Instituto Estadual do Ambiente (INEA-RJ), pelo apoio fornecido para execução do Programa Carbon Clima Rio. Em especial ao Engenheiro Florestal Telmo Borges, pela grande dedicação com a qualidade e a divulgação dos dados do Inventário Florestal Nacional do Estado do Rio de Janeiro.

Aos irmãos e irmãs do Centro e Pronto Socorro Espiritual Flor de Maria, em especial aos dirigentes Osvaldo e Marina e a filha Glória.

A todos os amigos e amigas do Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram com este estudo. A soma das partes, sempre será maior que o todo!



RESUMO

Diversos acordos internacionais sobre o clima, a biodiversidade e o uso sustentável das florestas exigem que os países informem continuamente a condição de seus recursos florestais. Portanto, as estimativas relacionadas às variáveis dendrométricas fornecem suporte essencial para a análise dos estoques florestais em largas escalas geográficas. Normalmente, os modelos convencionais que descrevem as relações alométricas das árvores são desenvolvidos de *in loco* e estão sujeitos a maiores fontes de erros quando usados em locais diferentes. Para contornar essa problemática, os pesquisadores florestais tentam generalizar esses modelos incluindo novas variáveis explicativas, para que os modelos possam se adaptar aos diferentes tipos de florestas e melhorar a precisão das estimativas. Nesse sentido, as relações alométricas das árvores foram investigadas em escala geográfica nas florestas naturais da Mata Atlântica no estado do Rio de Janeiro. Para isso, foram ajustadas equações para estimativa da altura total, espessura da casca e volumes do fuste e total das árvores nas diferentes tipologias florestais, considerando todo território geográfico do estado. Após o ajuste e seleção das melhores equações, os efeitos do clima, do solo e dos diferentes ambientes nas alometrias das árvores foram investigados. As equações ajustadas exibem elevado potencial de generalização das estimativas e considerável abrangência geográfica. No entanto, os resultados obtidos comprovam o efeito significativo do ambiente local na alometria das árvores. Como implicação, é recomendada a utilização de equações específicas por tipologia florestal ou espécie, a fim de minimizar os efeitos não quantificados pelas equações genéricas. Essa recomendação cabe principalmente para as variáveis alométricas sensíveis aos efeitos do ambiente, como a altura das árvores. Quanto ao efeito do ambiente, são apresentadas importantes evidências da influência do clima como a Precipitação e Sazonalidade da Precipitação e do solo como CTC, Fração de Areia e pH nas relações alométricas. Os resultados obtidos melhoram a compreensão ecológica acerca da variação alométrica das árvores nas florestas naturais, elucidando, em partes, a mudança do comportamento alométrico das árvores em diferentes ambientes.

Palavras-chave: Modelos Alométricos Regionais. Métodos Não-destrutivos. Gradientes Ambientais. Efeito do Ambiente.

ABSTRACT

Several international agreements on climate, biodiversity and sustainable use of forests require countries to continually report on the condition of their forest resources. Therefore, estimates related to dendrometric variables provide essential support for the analysis of forest stocks at large geographic scales. In general, basic models that describe the allometric relationships of trees are developed *in loco* and are subject to greater deviation when used in different locations. To solve this problem, forestry researchers try to generalize these models by including new explanatory variables, so that the models can adapt to different types of forests and improve the accuracy of estimates. In this context, the allometric relationships of trees were investigated on a geographic scale in the natural forests of the Atlantic Forest in the Rio de Janeiro state. For this, equations were fitted to estimate the total height, bark thickness and stem and total volumes of trees in different forest types, considering all state geographic territory. After fitting and selecting the best equations, the effects of climate, soil and different environments on tree allometry were investigated. Fitted equations show high potential for generalizing estimates and considerable geographic coverage. However, the results obtained prove the significant effect of the local environment on the trees allometry. As an implication, it is recommended to use specific equations by forest type or species, in order to minimize the effects not quantified by the generic equations. This recommendation is mainly for allometric variables sensitive to the effects of the environment, such as the height of trees. For the effect of the environment, is presented important evidence of the influence of climate as Precipitation and Precipitation Seasonality and soil as CTC, Sand Fraction and Ph on allometric relationships. The results obtained improve the ecological understanding of the allometric variation of trees in natural forests, elucidating, in part, the change in the allometric behavior of trees in different environments.

Keywords: Regional Allometric Models. Non-destructive methods. Environmental Gradients. Environmental Effects.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	VISTA PANORÂMICA DAS PRINCIPAIS TIPOLOGIAS FLORESTAIS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, EM QUE: A = FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL, B = FLORESTA OMBRÓFILA DENSE E C = FLORESTA DE RESTINGA.....	31
FIGURA 2 -	LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICAS DAS UNIDADES AMOSTRAIS INSTALADAS PELO IFN-RJ E DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM DAS ÁRVORES CUBADAS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO.....	33
FIGURA 3 -	MÉTODO NÃO-DESTRUTIVO DE CUBAGEM DE ÁRVORES EM PÉ, EM QUE: A = CUBAGEM DE FUSTE COM USO DA ESCADA, B = CUBAGEM DE FUSTE COM EQUIPAMENTOS DE ESCALADA, C = CUBAGEM DE COPAS COM EQUIPAMENTOS DE ESCALADA E D = ADAPTAÇÃO DA METODOLOGIA COM DOIS MENSURADORES PARA CUBAGEM DE ÁRVORES DE GRANDE PORTE.....	34
FIGURA 4 -	DISTRIBUIÇÃO DAS VARIÁVEIS ALOMÉTRICAS USADAS PARA O TESTE DOS EFEITOS DO AMBIENTE E AJUSTE DOS GLM'S.....	44
FIGURA 5 -	ANÁLISE EXPLORATÓRIA DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS NA ESTIMATIVA DO VOLUME DO FUSTE PARA AS TIPOLOGIAS FLORESTAIS. EM QUE: <i>DAP</i> : DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO (CM), <i>HF</i> : ALTURA DO FUSTE (M) E <i>VF</i> : VOLUME DO FUSTE (M ³)..	49
FIGURA 6 -	ANÁLISE EXPLORATÓRIAS DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS NA ESTIMATIVA DO VOLUME TOTAL PARA AS TIPOLOGIAS FLORESTAIS. EM QUE: <i>DAP</i> : DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO (CM), <i>HT</i> : ALTURA TOTAL (M) E <i>VT</i> : VOLUME TOTAL (M ³).....	50
FIGURA 7 -	ANÁLISE EXPLORATÓRIA DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS NA ESTIMATIVA DO VOLUME DO FUSTE PARA AS PRINCIPAIS ESPÉCIES MADEIREIRAS. EM QUE: <i>DAP</i> : DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO (CM), <i>HF</i> : ALTURA DO FUSTE (M) E <i>VF</i> : VOLUME DO FUSTE (M ³).....	51
FIGURA 8 -	DISPERSÃO DOS RESÍDUOS DOS MODELOS DE MELHOR AJUSTE PARA ESTIMATIVA DO VOLUME DO FUSTE NAS TIPOLOGIAS FLORESTAIS. EM QUE: A (MODELO 4 AJUSTADO PARA OS DADOS	

	GENÉRICOS), B (MODELO 4 AJUSTADO PARA FES), C (MODELO 4 AJUSTADO PARA FOD) E D (MODELO 4 AJUSTADO PARA RES).....	54
FIGURA 9 -	DISPERSÃO DOS RESÍDUOS DOS MODELOS DE MELHOR AJUSTE PARA ESTIMATIVA DO VOLUME TOTAL NAS TIPOLOGIAS FLORESTAIS. EM QUE: A (MODELO 3 AJUSTADO PARA OS DADOS GENÉRICOS), B (MODELO 3 AJUSTADO PARA A FES), C (MODELO 3 AJUSTADO PARA A FOD) E D (MODELO 3 AJUSTADO PARA RES).....	54
FIGURA 10 -	ANÁLISE GRÁFICA DOS RESÍDUOS ESTUDENTIZADOS PARA DETECÇÃO DE <i>OUTLIERS</i> . EM QUE: A (EQUAÇÃO GENÉRICA SELECIONADA PARA ESTIMATIVA DO VOLUME DO FUSTE) E B (EQUAÇÃO GENÉRICA SELECIONADA PARA ESTIMATIVA DO VOLUME TOTAL).....	55
FIGURA 11 -	VALIDAÇÃO DOS MODELOS SELECIONADOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME DO FUSTE PELA DISPERSÃO ENTRE VALORES ESTIMADOS E OBSERVADOS. EM QUE: A (MODELO 4 AJUSTADO PARA OS DADOS GENÉRICOS), B (MODELO 4 AJUSTADO PARA FES), C (MODELO 4 AJUSTADO PARA FOD) E D (MODELO 4 AJUSTADO PARA RES).....	56
FIGURA 12 -	VALIDAÇÃO DOS MODELOS SELECIONADOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME TOTAL PELA DISPERSÃO ENTRE OS VALORES ESTIMADOS E OBSERVADOS. EM QUE: A (MODELO 3 AJUSTADO PARA OS DADOS GENÉRICOS), B (MODELO 3 AJUSTADO PARA FES), C (MODELO 3 AJUSTADO PARA FOD) E D (MODELO 3 AJUSTADO PARA RES).....	57
FIGURA 13 -	DISPERSÃO DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MODELOS DE MELHOR AJUSTE PARA ESTIMATIVA DO VOLUME DO FUSTE DAS PRINCIPAIS ESPÉCIES MADEIREIRAS. EM QUE: A (MODELO 3 AJUSTADO PARA <i>Apuleia leiocarpa</i>), B (MODELO 4 AJUSTADO PARA <i>Astronium graveolens</i>), C (MODELO 3 AJUSTADO PARA <i>Miconia cinnamomifolia</i>) E D (MODELO 4 AJUSTADO PARA <i>Pseudopiptadenia contorta</i>).....	59
FIGURA 14 -	VALIDAÇÃO DAS EQUAÇÕES SELECIONADAS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME DO FUSTE PELA DISPERSÃO ENTRE OS VALORES	

	ESTIMADOS E OBSERVADOS. EM QUE: A (MODELO 3 AJUSTADO PARA <i>Apuleia leiocarpa</i>), B (MODELO 4 AJUSTADO PARA <i>Astronium graveolens</i>), C (MODELO 3 AJUSTADO PARA <i>Miconia cinnamomifolia</i>) E D (MODELO 4 AJUSTADO PARA <i>Pseudopiptadenia contorta</i>).....	60
FIGURA 15 -	DISPERSÃO E DISTRIBUIÇÃO DA ALTURA NAS DIFERENTES TIPOLOGIAS FLORESTAIS.....	62
FIGURA 16 -	DISPERSÃO E DISTRIBUIÇÃO DA ALTURA DAS DIFERENTES ESPÉCIES MADEIREIRAS.....	63
FIGURA 17 -	DISPERSÃO DOS RESÍDUOS DOS MODELOS DE MELHOR AJUSTE (MODELO 3) PARA ESTIMATIVA DA ALTURA TOTAL NAS TIPOLOGIAS FLORESTAIS. EM QUE: A (DADOS GENÉRICOS), B (FES), C (FOD) E D (RES).....	65
FIGURA 18 -	DISPERSÃO DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MODELOS DE MELHOR AJUSTE PARA ESTIMATIVA DA ALTURA TOTAL DAS ESPÉCIES MADEIREIRAS. EM QUE: MODELO 3 PARA A (<i>Apuleia leiocarpa</i>), B (<i>Astronium graveolens</i>) E C (<i>Miconia cinnamomifolia</i>) E MODELO 4 PARA D (<i>Pseudopiptadenia contorta</i>).....	66
FIGURA 19 -	COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DA EQUAÇÃO GENÉRICA (CURVA PRETA) E EQUAÇÕES ESPECÍFICAS AJUSTADAS (MODELO 3) PARA AS TIPOLOGIAS FLORESTAIS (CURVA VERMELHA). EM QUE: A (FES), B (FOD) E C (RES).....	67
FIGURA 20 -	COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DA EQUAÇÃO GENÉRICA (CURVA PRETA) E EQUAÇÕES ESPECÍFICAS AJUSTADAS (MODELO 3) PARA AS ESPÉCIES MADEIREIRAS (CURVA VERMELHA). EM QUE: A (<i>Apuleia leiocarpa</i>), B (<i>Astronium graveolens</i>), C (<i>Miconia cinnamomifolia</i>) E D (<i>Pseudopiptadenia contorta</i>).....	69
FIGURA 21 -	EFEITO DAS TIPOLOGIAS FLORESTAIS SOBRE A RELAÇÃO ALTURA X DIÂMETRO . EM QUE: FES (VERDE), FOD (VERMELHO), RES (AZUL) E EQUAÇÃO GENÉRICA (CURVA PRETA).....	70

FIGURA 22 -	ORDENAÇÃO DAS VARIÁVEIS ALOMÉTRICAS E COVARIÁVEIS AMBIENTAIS POR MEIO DA ANÁLISE DE MÚLTIPLOS FATORES, NA QUAL AS VARIÁVEIS DE RESPOSTA FORAM USADAS DE FORMA ILUSTRATIVA AO LONGO DAS DIMENSÕES (DAP, EC, HT E VF). EM QUE: A, REPRESENTA O CÍRCULO DE CORRELAÇÃO ENTRE OS GRUPOS DE VARIÁVEIS E B, REPRESENTA A CONTRIBUIÇÃO RELATIVA DE CADA COVARIÁVEL AMBIENTAL.....	72
FIGURA 23 -	ENVELOPES SIMULADOS PARA OS RESÍDUOS GERADOS PELOS MODELOS GENERALIZADOS FINAIS.....	74
FIGURA 24 -	ALTURA MÉDIA DAS ÁRVORES EM FUNÇÃO DAS COVARIÁVEIS SELECIONADAS PARA O MODELO GEOCLIMÁTICO. EM QUE: AS ÁREAS CINZAS, DELIMITAM OS INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95% E LINHAS PRETAS, CORRESPONDEM A ESTIMATIVA MÉDIA GERADA POR MEIO DO GLM.....	76
FIGURA 25 -	ESPESSURA MÉDIA DA CASCA DAS ÁRVORES EM FUNÇÃO DAS COVARIÁVEIS SELECIONADAS PARA O MODELO GEOCLIMÁTICO. EM QUE: AS ÁREAS CINZAS, DELIMITAM OS INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95% E LINHAS PRETAS, CORRESPONDEM A ESTIMATIVA MÉDIA GERADA POR MEIO DO GLM.....	77
FIGURA 26 -	VOLUME MÉDIO DO FUSTE DAS ÁRVORES EM FUNÇÃO DAS COVARIÁVEIS SELECIONADAS PARA O MODELO GEOCLIMÁTICO. EM QUE: AS ÁREAS CINZAS, DELIMITAM OS INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95% E LINHAS PRETAS, CORRESPONDEM A ESTIMATIVA MÉDIA GERADA POR MEIO DO GLM.....	78
FIGURA 27 -	VARIAÇÃO DAS RELAÇÕES ALOMÉTRICAS NOS DIFERENTES AMBIENTES CONTIDOS NA ÁREA DE ESTUDO. EM QUE: COLUNA A (TIPOLOGIAS FLORESTAIS), COLUNA B (TIPOS DE VEGETAÇÃO) E COLUNA C (POSIÇÃO SOCIOLÓGICA DAS ÁRVORES).....	79

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS, FLORÍSTICAS E CLIMÁTICAS DAS TRÊS TIPOLOGIAS FLORESTAIS AMOSTRADAS NO PRESENTE ESTUDO.....	32
TABELA 2 -	MODELOS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS PARA O AJUSTE DAS EQUAÇÕES DE VOLUME.....	37
TABELA 3 -	MODELOS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS PARA O AJUSTE DAS EQUAÇÕES HIPSOMÉTRICAS.....	39
TABELA 4 -	COVARIÁVEIS CLIMÁTICAS E EDÁFICAS EXTRAÍDAS PARA A LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS ÁRVORES MENSURADAS. AS VARIÁVEIS DESTACADAS EM NEGRITO FORAM USADAS PARA O TESTE DOS EFEITOS AMBIENTAIS.....	42
TABELA 5 -	VALORES MÉDIOS PARA AS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E EDÁFICAS NAS TIPOLOGIAS FLORESTAIS E TIPOS DE VEGETAÇÃO PREDOMINANTES NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO.....	48
TABELA 6 -	PARÂMETROS DE AJUSTE E PRECISÃO DOS MODELOS TESTADOS PARA ESTIMATIVA DOS VOLUMES DO FUSTE E TOTAL NAS TIPOLOGIAS FLORESTAIS.....	52
TABELA 7 -	ESTATÍSTICAS DE VALIDAÇÃO-CRUZADA DOS MODELOS SELECIONADOS PARA ESTIMATIVA DOS VOLUMES DO FUSTE E TOTAL NAS TIPOLOGIAS FLORESTAIS.....	55
TABELA 8 -	PARÂMETROS DE AJUSTE E PRECISÃO DOS MODELOS TESTADOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME DO FUSTE DAS ESPÉCIES PRINCIPAIS MADEIREIRAS.....	58
TABELA 9 -	ESTATÍSTICAS DE VALIDAÇÃO CRUZADA DAS EQUAÇÕES SELECIONADAS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME DO FUSTE DAS PRINCIPAIS ESPÉCIES MADEIREIRAS.....	59
TABELA 10 -	ESTATÍSTICAS DOS TESTES DE HIPÓTESE E COMPARAÇÃO DA PRECISÃO E ACURÁCIA ENTRE AS EQUAÇÕES DE VOLUME GENÉRICAS E ESPECÍFICAS POR TIPOLOGIA FLORESTAL E ESPÉCIE.....	61

TABELA 11 -	PARÂMETROS DE AJUSTE, PRECISÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS TESTADOS PARA ESTIMATIVA DA ALTURA TOTAL NAS TIPOLOGIAS FLORESTAIS.....	64
TABELA 12 -	PARÂMETROS DE AJUSTE, PRECISÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS AJUSTADOS PARA ESTIMATIVA DA ALTURA TOTAL DAS ESPÉCIES MADEIREIRAS.....	66
TABELA 13 -	ESTATÍSTICAS DOS TESTES DE HIPÓTESE E COMPARAÇÃO DA PRECISÃO E ACURÁCIA ENTRE AS EQUAÇÕES DE HIPSOMÉTRICAS GENÉRICAS E ESPECÍFICAS POR TIPOLOGIA FLORESTAL E ESPÉCIE.....	68
TABELA 14 -	PARÂMETROS DE AJUSTE DOS MODELOS CONSTRUÍDOS PARA TESTAR O EFEITO DAS TIPOLOGIAS FLORESTAIS SOBRE A RELAÇÃO $H \times D$	69
TABELA 15 -	RESULTADOS DOS MODELOS LINEARES DE EFEITO MISTO AJUSTADOS PARA ANÁLISE DOS EFEITOS DAS TIPOLOGIAS FLORESTAIS E ESPÉCIES DO BIOMA MATA ATLÂNTICA NA ALTURA TOTAL DAS ÁRVORES; Σ^2 : VARIÂNCIA RESIDUAL; T_{00} : VARIÂNCIA ALEATÓRIA DO INTERCEPTO.....	71
TABELA 16 -	PARÂMETROS DE AJUSTE E PRECISÃO DOS MODELOS GENERALIZADOS GEOCLIMÁTICOS AJUSTADOS PARA SELEÇÃO DAS COVARIÁVEIS AMBIENTAIS.....	73
TABELA 17 -	COMPARAÇÃO DOS MODELOS GENERALIZADOS ALOMÉTRICOS E GEOCLIMÁTICOS PARA AS TRÊS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS DE RESPOSTA.....	75
TABELA 18 -	MODELOS GENERALIZADOS CATEGÓRICOS AJUSTADOS PARA DESCRIÇÃO DAS RELAÇÕES ALOMÉTRICAS POR AMBIENTE, CONSIDERANDO AS TIPOLOGIAS FLORESTAIS, TIPOS DE VEGETAÇÃO E POSIÇÃO SOCIOLÓGICA COMO FATORES.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS

Apu – *Apuleia leiocarpa* (Vogel) J. F. Macbr.

Ast – *Astronium graveolens* Jacq.

dap – diâmetro a altura do peito, medido a 1,3 metros do solo (cm)

ec – espessura média da casca (cm)

FES – Floresta Estacional Semidecidual

FOD – Floresta Ombrófila Densa

ht – altura total da árvore (m)

hf – altura do fuste (m)

IFNRJ – Inventário Florestal Nacional do Rio de Janeiro

Mic – *Miconia cinnamomifolia* (DC.) Naudin

Pse - *Pseudopiptadenia contorta* (DC.) G. P. Lewis & M. P. Lima

RES – Floresta de Restinga

vf – volume do fuste (m³)

vt – volume total (m³)

vc – volume da copa (m³)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	OBJETIVOS.....	20
1.1.1	Objetivo Geral.....	20
1.1.2	Objetivos Específicos.....	20
1.2	HIPÓTESES.....	20
1.3	ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	21
2.	REVISÃO DA LITERATURA.....	22
2.1	AS FLORESTAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO.....	22
2.2	INVENTÁRIO FLORESTAL NACIONAL.....	22
2.3	MODELOS DENDROMÉTRICOS DESENVOLVIDOS NO BRASIL.....	24
2.4	EFEITO DOS FATORES AMBIENTAIS NAS RELAÇÕES ALOMÉTRICAS.....	26
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.1	LOCAL DE ESTUDO E COLETA DE DADOS.....	30
3.1.1	Método Não-destrutivo.....	33
3.1.2	Volume do Fuste.....	34
3.1.3	Volume Total.....	35
3.1.4	Relação Hipsométrica.....	35
3.1.5	Espessura da Casca.....	35
3.2	ANÁLISE PRÉ-EXPLORATÓRIA.....	36
3.3	MODELAGEM DO VOLUME.....	36
3.3.1	Ajuste e seleção dos modelos de volume.....	36
3.3.2	Validação dos modelos e avaliação da hipótese.....	38
3.4	MODELAGEM DA RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA.....	39
3.4.1	Ajuste e seleção dos modelos hipsométricos.....	39
3.4.2	Avaliação da hipótese elaborada.....	40
3.5	EFEITO DOS FATORES AMBIENTAIS NAS RELAÇÕES ALOMÉTRICAS.....	41
3.5.1	Variáveis ambientais.....	41
3.5.2	Seleção das covariáveis e ajuste dos modelos geoclimáticos.....	43
3.5.3	Efeitos dos ambientes na alometria das árvores.....	46
4.	RESULTADOS.....	49
4.1	MODELOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME.....	49
4.1.1	Análise exploratória dos dados.....	49

4.1.2	Tipologias florestais.....	51
4.1.3	Espécies madeireiras.....	57
4.1.4	Hipótese Elaborada.....	60
4.2	MODELOS PARA ESTIMATIVA DA RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA.....	61
4.2.1	Análise exploratória dos dados.....	61
4.2.2	Tipologias florestais.....	63
4.2.3	Espécies madeireiras.....	65
4.2.4	Hipótese Elaborada.....	67
4.3	EFEITO DOS FATORES AMBIENTAIS NA ALOMETRIA DAS ÁRVORES.....	71
4.3.1	Modelos alométricos geoclimáticos.....	71
4.3.2	Efeito do ambiente na alometria das árvores.....	78
5.	DISCUSSÃO.....	81
5.1	MODELOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME.....	81
5.1.1	Análise exploratória dos dados.....	81
5.1.2	Tipologias florestais.....	82
5.1.3	Espécies madeireiras.....	84
5.2	MODELOS PARA ESTIMATIVA DA RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA.....	86
5.2.1	Análise exploratória dos dados.....	86
5.2.2	Tipologias florestais.....	87
5.2.3	Espécies madeireiras.....	88
5.2.4	Hipótese: efeito das tipologias e espécies sobre a equação genérica.....	89
5.3	EFEITO DOS FATORES AMBIENTAIS NA ALOMETRIA DAS ÁRVORES.....	92
5.3.1	Modelos alométricos geoclimáticos.....	92
5.3.2	Efeitos dos ambientes.....	96
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	101
	REFERÊNCIAS.....	102
	APÊNDICES.....	116
	ANEXOS.....	122

1. INTRODUÇÃO

Diversos acordos internacionais sobre o clima, a biodiversidade e o uso sustentável das florestas exigem que os países informem continuamente a condição de seus recursos florestais (MCROBERTS et al., 2012; VIDAL et al., 2016). Nesse contexto, os Inventários Florestais Nacionais são a mais importante fonte primária de dados para o diagnóstico dos recursos em grande escala (MCROBERTS et al., 2012), em que as estimativas alométricas individuais das árvores amostradas são essenciais para analisar os estoques madeireiros (GSCHWANTNER et al., 2019). Assim, as estimativas geradas pelos modelos de árvore individual são agregadas ao nível de parcelas, fornecendo estimativas para grandes áreas (MCROBERTS & WESTFALL, 2015).

As estimativas relacionadas às variáveis dendrométricas são um tema central das ciências florestais e fornecem suporte essencial para o desenvolvimento de atividades de inventário florestal, manejo florestal e silvicultura. Normalmente, os modelos convencionais que descrevem as relações alométricas das árvores são desenvolvidos *in loco* e estão sujeitos a maiores fontes de erros quando usados em locais diferentes (KEARSLEY et al., 2017; FAYOLLE et al., 2018; MENSAH et al., 2018; FORTIN et al., 2019). Para contornar essa problemática, os pesquisadores florestais tentam generalizar esses modelos desde a década de 1960, incluindo variáveis explicativas em nível de árvore e parcela, para que os modelos possam se adaptar aos diferentes tipos de florestas e melhorar a precisão das estimativas (FANG & BAILEY, 1998; CHAVE et al., 2005; SLIK et al., 2010; FORRESTER et al., 2017; FORTIN et al., 2019).

Modelos genéricos são equações gerais simples que não possuem coeficientes específicos para cada espécie ou tipo de vegetação, descrevendo a relação alométrica de conjuntos totais de dados (MENSAH et al., 2018). No entanto, as relações alométricas variam entre regiões geográficas, devido, sobretudo, aos gradientes climáticos (FELDPAUSCH et al., 2011; TEMESGEN et al., 2014; HULSHOF et al., 2015; MENSAH et al., 2018). Essa variação pode ocorrer até mesmo dentro de uma mesma região, devido à composição de espécies e condições ambientais locais (SCARANELLO et al., 2012; VIBRANS et al., 2015a; VIBRANS et al., 2015b).

Tendo em vista que vários fatores podem gerar variabilidade nas relações alométricas, a validade das equações genéricas para diferentes regiões precisa ser quantificada (KEARSLEY et al., 2017). Portanto, a variabilidade nas relações alométricas ainda é um obstáculo para a calibração de modelos preditivos em florestas naturais (VIBRANS et al., 2015b). Para

contornar essa dificuldade, o uso de equações específicas por local tem sido uma recomendação frequente (KEARSLEY et al., 2017; MENSAH et al., 2018), devido, principalmente, aos elevados erros gerados pelas equações regionais, continentais e pantropicais, quando aplicadas em uma escala mais fina.

No Brasil, poucos estudos investigaram os modelos de volume em escalas geográficas (VIBRANS et al., 2015a). Devido à característica destrutiva das análises (GIMENEZ et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2018), as equações de volume são ainda mais escassas para a Mata Atlântica, onde encontram impedimentos legais para o corte das árvores. Como a confiabilidade dessas estimativas depende da extensão e abrangência dos dados disponíveis (AKINDELE & LEMAY, 2006), a necessidade de desenvolver novas equações de volume locais é evidente (VIBRANS et al., 2015a). No entanto, para os ecossistemas ameaçados, como a Mata Atlântica (MYERS et al., 2000), é necessária a aplicação de métodos não destrutivos que forneçam bons resultados sem o corte das árvores (GIMENEZ et al., 2017).

A maioria das equações dendrométricas desenvolvidas nas florestas tropicais foram ajustadas para estimar apenas o volume do fuste das árvores, ignorando o volume das copas (SEGURA & KANNINEN, 2005; OLIVEIRA et al., 2018). Essas equações omitem um importante componente lenhoso das árvores, subestimando os estoques madeireiros presentes nas florestas. Outra crítica recorrente está relacionada aos métodos de seleção das equações, que podem representar a maior fonte de incerteza na quantificação dos estoques florestais (SILESHI, 2014). As equações desenvolvidas no Brasil comumente ignoraram os pressupostos da regressão linear, a correção da discrepância logarítmica e o recálculo dos parâmetros estatísticos na escala natural das variáveis (VIBRANS et al., 2015a). Essas inconsistências podem comprometer a integridade das novas estimativas sobre os estoques florestais (SILESHI, 2014), gerando previsões duvidosas. Portanto, a escassez de equações, associada à fragilidade estatística presente nas equações disponíveis, ainda representa uma lacuna de conhecimento sobre os estoques madeireiros em larga escala no Brasil.

Incontestavelmente, a altura das árvores é uma das variáveis mais importantes para a avaliação quantitativa dos estoques nas florestas tropicais. Embora útil, a medição da altura das árvores em inventários de florestas tropicais é onerosa, sobretudo pela dificuldade de visualização nas florestas densas (LARJAVAARA & MULLER-LANDAU, 2013; LI et al., 2015; CASSOL et al., 2018). A relação existente entre o diâmetro (d) e a altura (h) das árvores pode ser expressa por modelos lineares e não-lineares. Assim, a estimativa da altura em função do diâmetro, sendo uma variável mensurada na maioria dos inventários florestais, é uma prática comum nas florestas tropicais (MENSAH et al., 2018). Portanto, esses modelos podem ser

utilizados para aprimorar as estimativas de biomassa e carbono florestal, especialmente em inventários em que apenas o diâmetro foi medido (FELDPAUSCH et al., 2012; HUNTER et al., 2013; LEWIS et al., 2013; CHAVE et al., 2014).

Adicionalmente, os modelos que expressam a relação altura-diâmetro das árvores ($h \times d$) são uma alternativa para determinar padrões da estrutura de comunidades florestais (HULSHOF et al., 2015), especialmente quando a medição da altura não é viável (VIBRANS et al., 2015b). Além disso, são ferramentas essenciais para entender a dinâmica florestal por meio de equações de crescimento baseadas em processos ecofisiológicos (LI et al., 2015; MENSAH et al., 2018). Tais modelos são componentes importantes para a calibração de produtos de sensoriamento remoto, utilizados para estimativa dos estoques em florestas naturais (KEARSLEY et al., 2017). Nesse sentido, os modelos preditivos que expressam com precisão a relação $h \times d$ das árvores apresentam importância para o diagnóstico dos recursos florestais em grandes escalas.

Na Mata Atlântica, o efeito do ambiente sobre as relações alométricas das árvores, ainda não foi testado em escalas geográficas marcadas pela heterogeneidade ambiental, persistindo uma lacuna no entendimento dessas relações. As intensas variações florística e estrutural existentes entre as florestas da Mata Atlântica, associadas à elevada diversidade de ambientes e à fragmentação (RIBEIRO et al., 2009; BERGAMIN et al., 2012; EISENLOHR & OLIVEIRA-FILHO, 2014; REZENDE et al., 2015; RODRIGUES et al., 2019) ressaltam a dificuldade em modelar as relações alométricas das árvores em escalas geográficas. Nesse sentido, é evidenciada a necessidade de desenvolvimento de novas equações locais para os diferentes ambientes e tipos de florestas (SCARANELLO et al., 2012; VIBRANS et al., 2015a; VIBRANS et al., 2015b).

Como as árvores otimizam sua alometria em diferentes ambientes, é de se esperar que existem tendências previsíveis em suas características arquitetônicas ao longo de gradientes ambientais (BANIN et al., 2012). Nesse sentido, a literatura reporta efeitos significativos do ambiente na alometria das árvores em escalas geográficas, especialmente para características do clima (FELDPAUSCH et al., 2011; SCHNEIDER et al., 2018; FORTIN et al., 2019), do solo (URBAN et al., 2014; JONES et al., 2019), da estrutura da floresta e da diversidade de espécies (BANIN et al., 2012; FORRESTER et al., 2017; RÍO et al., 2018) e da carga de lianas sobre as árvores (DIAS et al., 2016). Portanto, a inclusão de preditores ambientais com boa relação custo benefício facilita o entendimento da distribuição dos atributos das florestas (MARSHALL et al., 2012). Adicionalmente, os preditores ambientais podem esclarecer as relações biológicas existentes entre os atributos do ambiente e as características alométricas das

árvores e, assim, permitem prever a variação do comportamento alométrico das árvores em diferentes ambientes.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Gerais

Desenvolver modelos alométricos para estimativa de variáveis dendrométricas de interesse, para as principais tipologias florestais e espécies madeireiras da Mata Atlântica, no Estado do Rio de Janeiro e testar o efeito dos fatores ambientais e de diferentes ambientes nas relações alométricas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Ajustar equações para estimativa da altura total, do volume do fuste e do volume total das árvores das principais tipologias florestais e espécies madeireiras;
- Comparar a acurácia e a precisão de equações genéricas específicas geradas por tipologias e espécies florestais;
- Investigar o efeito dos fatores ambientais (clima e solo) nas relações alométricas das árvores;
- Selecionar variáveis climáticas e edáficas com potencial de explicação das variáveis dendrométricas;
- Analisar o efeito dos diferentes ambientes (tipologias florestais, tipos de vegetação e posição sociológica) nas relações alométricas das árvores.

1.2 HIPÓTESES

Com base no efeito dos diferentes locais e tipos de floresta verificado no ajuste de modelos alométricos para escalas geográficas (MAUYA et al., 2014; VIBRANS et al., 2015a,b; KEARSLEY et al., 2017; MENSAH et al., 2018), foram elaboradas as hipóteses:

- Em decorrência do aumento da variabilidade dos dados, as equações genéricas podem acarretar em redução da acurácia para predições específicas por tipologia e espécie florestal;
- Para escalas geográficas, o efeito das diferentes tipologias florestais pode comprometer a modelagem genérica das relações alométricas.

Diante das constatações do efeito do clima nas relações alométricas das árvores em escalas geográficas (CHAVE et al., 2005; FELDPAUSCH et al., 2011; SCHNEIDER et al., 2017; FORTIN et al., 2019) e com objetivo de melhor compreender os efeitos do ambiente nessas relações, foram elaboradas as hipóteses:

- A variação das relações alométricas entre as florestas da Mata Atlântica é induzida pelos efeitos do ambiente;
- As variáveis climáticas e edáficas permitem maior explicação e entendimento das relações alométricas em escalas geográficas.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A Tese está estruturada em três tópicos, relacionados diretamente com o objetivo geral da pesquisa. A organização está fundamentada em uma sequência lógica, em que, as evidências da variação das relações alométricas entre os ambientes, constatadas nos primeiros tópicos, levam a elaboração do tópico final e a investigação do efeito do ambiente na determinação das alometrias.

Nesse sentido, equações foram ajustadas no primeiro tópico para a estimativa dos volumes do fuste e total das árvores em toda extensão geográfica do estado do Rio de Janeiro. A eficiência e a precisão das equações genéricas foram comparadas com as equações específicas ajustadas para as principais tipologias florestais e espécies. No segundo tópico, uma abordagem semelhante ao primeiro foi adotada com enfoque no ajuste de modelos hipsométricos para estimativa da altura total das árvores. A análise e a discussão do efeito das tipologias florestais na relação alométrica foi aprofundada. Por fim, no terceiro tópico foram analisados os efeitos do clima e do solo na determinação das relações alométricas das árvores e os possíveis fatores motivadores das variações nas alometrias entre ambientes distintos da Mata Atlântica.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 AS FLORESTAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Inúmeras unidades geomorfológicas estão contidas no estado do Rio de Janeiro, que, em conjunto com características ambientais peculiares, dão origem a diversos tipos de vegetação e paisagens, conferindo uma das maiores diversidades de plantas dentro do bioma Mata Atlântica (WERNECK et al., 2011; COELHO et al., 2017). Essa vegetação varia desde as restingas nas planícies litorâneas ao nível do mar (ROCHA et al., 2007), até os campos de altitude em locais superiores a 1.800 m.s.n.m. (SAFFORD, 2007). No entanto, destacam-se as florestas ombrófilas e estacionais (COELHO et al., 2017), que juntas ocupam uma área de 96% do território estadual (SFB, 2018).

Algumas evidências sugerem que as florestas da Mata Atlântica, especialmente no Rio de Janeiro, são formadas por mosaicos que compreendem diversas comunidades de plantas. Esses ecossistemas experimentam uma ampla gama de condições ambientais (temperatura, pluviosidade e solos), que influenciam sua diversidade, produtividade e complexidade estrutural (SCARANO, 2002). Estudos florísticos evidenciam a heterogeneidade entre as formações florestais da Mata Atlântica, condicionada às variações ambientais e aos aspectos fitogeográficos (OLIVEIRA-FILHO & FONTES, 2000; NETTESHEIM et al., 2010). Assim, revelam importantes informações como diferenças ou semelhanças entre as florestas ombrófilas, estacionais e outras formações florestais.

A cobertura vegetal no estado do Rio de Janeiro foi intensamente alterada nos últimos séculos, devido principalmente à expansão dos centros urbanos e as atividades agropecuárias (JOLY et al., 1999; COELHO et al., 2017). Atualmente, restam aproximadamente 20% de sua cobertura natural (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA/INPE, 2018), representada por uma vegetação fragmentada e amplamente dispersa (TABARELLI et al., 2005; RIBEIRO et al., 2009).

2.2 INVENTÁRIO FLORESTAL NACIONAL

Os primeiros Inventários Florestais Nacionais (IFN's) implementados no mundo datam de 100 anos, em que o único objetivo era o conhecimento dos estoques disponíveis de madeira (KLEINN, 2017). No entanto, os aspectos ecológicos e sociais das florestas eram desprezados. No Brasil, uma edição única do Inventário Florestal Nacional foi posta em prática

em 1980, com objetivo principal de conhecer os estoques madeireiros das florestas naturais e plantadas (SFB, 2018). Somente em 1996, foi publicada a primeira proposta metodológica para execução do IFN no Brasil (BRENA, 1996), formalizando, assim, a ideia de um inventário nacional adaptado para a realidade do país.

Devido à necessidade de um reporte contínuo e atualizado dos recursos florestais em larga escala, para atendimento aos acordos internacionais do clima e da biodiversidade (MCROBERTS et al., 2012; VIDAL et al., 2016), os IFN's são um pré-requisito básico para as ações governamentais de conservação e uso sustentável das florestas (KLEINN, 2017; DAVID, 2018). Impulsionadas pelos acordos internacionais, algumas adaptações foram incorporadas ao escopo dos IFN's, que atualmente estão concentrados na gestão sustentável dos ecossistemas (VIDAL et al., 2016). Essas adaptações foram baseadas em uma visão ambiental mais ampla das florestas, considerando os aspectos sobre a biodiversidade, vitalidade e função social.

A intensa perda de área florestal no Brasil nas últimas décadas, estimulou o Governo Federal a buscar conhecimento sobre a situação atual de suas florestas e atender assim, os requisitos estabelecidos pelos acordos internacionais. Em meados de 2005, foi formado pelo Serviço Florestal Brasileiro um comitê técnico, reunindo pesquisadores da área florestal para discussão e elaboração de uma nova proposta. Como resultado dessas reuniões, em 2007 iniciaram as atividades de campo no Brasil no estado de Santa Catarina, seguido do Distrito Federal em 2009 (SFB, 2019). Atualmente, 17 estados da Federação concluíram as etapas de campo, realizando o inventário de 45 % da área do país, com a medição efetiva de 9.880 unidades amostrais (SFB, 2019).

Somente em 2014, o estado do Rio de Janeiro iniciou as atividades de campo, concluindo o trabalho com a publicação de um relatório técnico no ano de 2018 (SFB, 2018). Esse relatório apresenta informações importantes sobre a extensão, distribuição, diversidade biológica, saúde, vitalidade, estoques e funções socioambientais das florestas no estado. No entanto, algumas informações ainda são insuficientes. Devido principalmente à baixa disponibilidade de dados locais, como informações sobre as espécies e modelos alométricos regionais. Assim, parcerias com instituições de ensino e pesquisa vem sendo firmadas, no intuito de atender demandas mais específicas e complementar a análise dos dados coletados em campo.

2.3 MODELOS DENDROMÉTRICOS DESENVOLVIDOS NO BRASIL

Nas últimas décadas, inúmeras equações dendrométricas foram desenvolvidas no Brasil, por meio do ajuste de modelos clássicos da literatura florestal, com uso de técnicas de regressão linear e não-linear. Basicamente, essas equações estimam características de interesse das árvores e de difícil obtenção, como o volume de madeira (m^3) e as alturas total e do fuste (m), em função de variáveis de fácil obtenção, como o diâmetro à altura do peito (cm), medido em todos os inventários florestais pela facilidade e exatidão em sua medição. Devido à crescente demanda de madeira plantada e de fonte natural no último século (RAUNIKAR et al., 2010; BUONGIORNO et al., 2011), as equações de volume e biomassa concentraram a maior parte da atenção dos cientistas florestais.

Em 2014, as equações de volume e afilamento ajustadas nas diferentes regiões e estados do Brasil foram organizadas e compiladas na forma de um compêndio (FIGUEIREDO FILHO et al., 2014). Como resultado desse documento, o estado do Rio de Janeiro consta como um dos mais deficientes quanto às equações citadas. Adicionalmente, a maioria das equações ajustadas no Brasil são específicas, referentes a apenas uma espécie, geralmente madeireira e de interesse comercial. Notadamente, as equações genéricas ajustadas para diversas espécies apresentam abrangência apenas local, desenvolvidas principalmente para planos de manejo florestal na região Amazônica. Como exemplos: Higuchi & Hamm (1985); Batista et al. (2004); Rolim et al. (2006); Colpini et al. (2009); Thaines et al. (2010); Barreto et al. (2014); Gimenez et al. (2015, 2017); Tonini et al. (2015); Correia et al. (2017); Cysneiros et al. (2017); e Krainovic et al. (2017).

Entretanto, as equações mais abrangentes para escalas geográficas como regiões, estados, tipologias e formações florestais, foram pouco investigadas (VIBRANS et al., 2015a), principalmente da Mata Atlântica. Assim, uma lacuna para estimativa do volume de madeira em extensas regiões geográficas persiste e equações locais são empregadas de forma generalizada e equivocada, para diferentes regiões e tipos florestais. Cabe ressaltar que a maioria das equações de volume desenvolvidas para as florestas naturais do Brasil foram ajustadas para estimar apenas o volume do fuste das árvores, ignorando o volume das copas e omitindo um importante componente lenhoso das árvores (OLIVEIRA et al., 2018). Outro fator negativo é que as equações desenvolvidas no Brasil comumente ignoraram os pressupostos da regressão linear, a discrepância logarítmica e o recálculo dos parâmetros estatísticos para os modelos com variável transformada (VIBRANS et al., 2015). Notadamente, esse descuido pode

gerar graves equívocos na avaliação e seleção de equações (SILESHI, 2014), comprometendo, assim, toda modelagem estatística.

Com a implementação do Inventário Florestal Nacional no Brasil, a demanda por novas equações alométricas locais e regionais, que estimem com precisão o volume e a altura das árvores, tornou-se evidente. Nesse contexto, o estado de Minas Gerais foi o pioneiro ao desenvolver equações para diversos tipos de florestas e espécies arbóreas, ao longo de todo o território estadual (SCOLFORO et al., 2008). Essas equações deram apoio às análises do Inventário Florestal de Minas Gerais e até hoje são aplicadas em estudos sobre as florestas do estado para diferentes abordagens e escalas geográficas (MORAIS et al., 2014; SCOLFORO et al., 2015; SCOLFORO et al., 2016; SILVEIRA et al., 2019).

No contexto do IFN, a mais importante abordagem para desenvolvimento de equações de volume foi elaborada por Vibrans et al. (2015a) no estado de Santa Catarina. Nesse estudo, as unidades amostrais do IFN foram utilizadas como referência para a amostragem e mensuração das árvores. Assim, foram ajustadas equações genéricas para todas as florestas do estado e para as três principais tipologias florestais em termos de cobertura, além de equações específicas para as principais espécies madeireiras por tipologia. Devido a consistência e representatividade da amostra e a robustez das análises estatísticas aplicadas no ajuste, seleção e validação dos modelos, foram geradas equações precisas, confiáveis e com ampla abrangência geográfica. No entanto, apenas o volume do fuste foi abordado, ignorando o volume da copa, que representa uma porção considerável do volume total das árvores.

Recentemente, um novo e importante estudo foi realizado no estado de Santa Catarina por Oliveira et al. (2018). Esses autores complementaram uma parte da base de dados usada por Vibrans et al. (2015a), por meio da cubagem de copas, apenas na região da Floresta Ombrófila Densa. Como o objetivo do estudo foi fornecer subsídio ao manejo das florestas secundárias na região, um enfoque específico foi dado às espécies madeireiras e de rápido crescimento, típicas da tipologia florestal considerada.

Após o volume de madeira, a altura das árvores é uma das mais importantes variáveis dendrométricas. A relação existente entre o diâmetro (d) e a altura (h) das árvores pode ser expressa por modelos lineares e não-lineares (LI et al., 2015), facilitando as estimativas para essa variável e o ajuste de equações hipsométricas. Para as florestas da Mata Atlântica, as equações hipsométricas genéricas ajustadas são locais ou específicas (BATISTA et al., 2001; BARTOSZECK et al., 2003; SOARES et al., 2011; SANQUETTA et al., 2013; CURTO et al., 2014; BARBOSA et al., 2019), apresentando pouca abrangência geográfica e reduzida capacidade de generalização das estimativas.

Uma das primeiras pesquisas focadas na modelagem da relação altura x diâmetro das árvores em maiores escalas na Mata Atlântica foi realizada por Scaranello et al. (2012) no estado de São Paulo em um gradiente altitudinal da Floresta Ombrófila Densa. O gradiente altitudinal analisado compreende os tipos de vegetação: restinga, terras baixas, sub-montana e montana, descritos em IBGE (2012). Portanto, foram ajustadas equações hipsométricas para cada tipo de vegetação e constatado o efeito da altitude na estimativa da altura das árvores, em que a necessidade de modelos específicos para cada tipo de vegetação foi enfatizada para a obtenção de resultados mais precisos.

Para o estado de Santa Catarina, a relação altura x diâmetro das árvores foi investigada no âmbito do IFN para as três principais tipologias florestais e principais espécies arbóreas (VIBRANS et al., 2015b), por meio do ajuste de modelos hipsométricos em larga escala geográfica. Como resultado, as tipologias mais semelhantes em composição florística e estrutura apresentaram maior semelhança quanto à relação hipsométrica. Além disso, esses autores mencionaram que as diferenças ambientais entre as tipologias podem comprometer a precisão das equações genéricas ajustadas para todas as florestas em conjunto.

A modelagem da espessura da casca das árvores é mais complexa, mesmo considerando apenas uma espécie e utilizando variáveis em nível de árvore e parcela, associadas a fatores climáticos (STÄNGLE et al., 2017). Os modelos gerados para predição da espessura da casca são pouco precisos e baseados na combinação de diversos fatores que afetam o crescimento das árvores ou baseados em variáveis de difícil obtenção, como idade da árvore, índice de sítio e taxa de crescimento individual.

Em relação à casca das árvores, o único estudo desenvolvido nas florestas naturais do Brasil, abordou a alometria comparativa do diâmetro e da espessura da casca, entre espécies florestais e savânicas (HOFFMAN et al., 2003). Esse estudo abordou uma comparação ecológica, a fim de entender como as espécies florestais e da savana diferem em características relacionadas à tolerância ao fogo. Nesse sentido, nas florestas tropicais, as explicações para a variação da espessura e de outras características ainda não estão claras e novos estudos ainda são necessários (PAINE et al., 2010; JONES et al., 2019).

2.4 EFEITO DOS FATORES AMBIENTAIS NAS RELAÇÕES ALOMÉTRICAS

Na Mata Atlântica, o efeito dos diferentes ambientes foi constatado ao investigar as relações alométricas das árvores em escalas geográficas. No estado de Santa Catarina, as diferentes tipologias florestais apresentam efeitos sobre a altura total e o volume do fuste das

árvores (VIBRANS et al., 2015a; 2015b). Na Floresta Ombrófila Densa do estado de São Paulo, efeitos das diferentes cotas altitudinais foram constatados na alometria altura x diâmetro das árvores (SCARANELLO et al., 2012). No entanto, esses estudos discutiram esses efeitos apenas de forma indireta, relacionando as diferenças nas alometrias entre os ambientes com possíveis causas, como similaridade florística, estrutura da floresta, fatores climáticos, edáficos e topográficos. Portanto, não foi realizada uma investigação minuciosa de como os fatores do ambiente determinam as relações alométricas e como o comportamento alométrico das árvores varia entre os diferentes ambientes na Mata Atlântica.

Muitos estudos foram desenvolvidos nas últimas décadas, testando o efeito de variáveis locais da parcela nas relações alométricas, no entanto, as variáveis climáticas foram negligenciadas na maioria dos estudos (FORTIN et al., 2019). Para as florestas temperadas, foi comprovado que a forma das árvores não está relacionada apenas às características da floresta, mas também ao clima em que se desenvolvem (SCHNEIDER et al., 2018). Nesse sentido, o efeito do clima nas relações alométricas das árvores em escalas geográficas tem sido constatado em diversos estudos (FELDPAUSCH et al., 2011; CHAVE et al., 2015; HULSOFF et al., 2015; ZHANG et al., 2018; FORTIN et al., 2019).

No entanto, esse efeito é variável e pode se manifestar de forma negativa ou positiva, dependendo da espécie e das condições do clima local. Para 44 espécies, ao longo de todo o território da França, o efeito da temperatura foi significativo em 33 espécies, enquanto o da precipitação em sete (FORTIN et al., 2019). Esses autores verificaram um maior efeito da temperatura sobre altura da árvore, quando comparado ao efeito da precipitação. A sensibilidade do afilamento do tronco de algumas espécies ao clima também foi constatada em florestas temperadas na província de Quebec no Canadá (SCHNEIDER et al., 2018). Assim, é demonstrado que a conicidade do fuste das árvores diminui com a temperatura e aumenta com a precipitação, com efeitos menos evidentes em espécies mais tolerantes à sombra.

É de se esperar que diversos fatores bióticos e abióticos exerçam influência na alometria das árvores nas florestas naturais. Devido à complexidade das interações ecológicas, os resultados disponíveis na literatura não são consensuais e diversos fatores do ambiente são citados como determinantes para a alometria das árvores. Considerando uma escala Pantropical, foi comprovada a dependência da alometria das árvores em relação às condições do ambiente, a estrutura da floresta e aos fatores biogeográficos históricos nos quatro principais continentes (BANIN et al., 2012). Para os seis maiores tipos florestais da Europa, foi demonstrada forte influência da estrutura e da composição de espécies nas relações alométricas (FORRESTER et al., 2017). Esses autores acrescentam que essa influência pode ser quantificada usando medidas

de competição, diversidade e altura relativa, ampliando a capacidade de generalização das equações.

Nas florestas tropicais, a altura do fuste das árvores é significativamente maior onde a área basal é maior e onde há menor número de fustes (BANIN et al., 2012). Isso sugere que a presença de árvores grandes induz a competição, indo de acordo com a teoria do “vizinho”, em que as árvores tendem a ser mais esbeltas em condições de competição (LARSON, 1963). Nas florestas tropicais da África, as relações alométricas das árvores foram modeladas com êxito por meio de variáveis como a inclinação do terreno, o tipo de vegetação, a presença de extração da madeira e a temperatura mínima (MARSHALL et al., 2012). Na pesquisa de Marshall et al. (2012), as variáveis edáficas não produziram modelos estáveis para o gradiente altitudinal analisado. Contraditoriamente, em florestas secundárias neotropicais da Costa Rica, os atributos químicos do solo são os principais fatores que explicam a variação do estoque aéreo de biomassa, em detrimento a variáveis climáticas, da estrutura da floresta e da configuração da paisagem (SANTIGO-GARCIA et al., 2019). Adicionalmente, os efeitos do ambiente na alometria das árvores variam de acordo com a espécie e suas características ecológicas (ALVES & SANTOS, 2002; BOHLMAN & O'BRIENEN, 2006; POORTER et al., 2006), com diferenças nítidas, por exemplo, entre coníferas e folhosas (SCHNEIDER et al., 2017).

Aparentemente, a altura é a variável dendrométrica mais sensível ao efeito da variação ambiental. Por esse motivo, é o foco principal das pesquisas que investigaram o efeito do clima, dos solos e da estrutura da floresta nas relações alométricas, por exemplo: Feldpausch et al. (2011); Banin et al. (2012); Marshall et al. (2012); Urban et al. (2013); Chave et al. (2014); Hulsof et al. (2015); Zhang et al. (2018); e Fortin et al. (2019). Em relação à modelagem da espessura da casca por meio de variáveis do ambiente e da floresta, o único estudo disponível investigou essa característica apenas para *Picea abies* (L.) H. Karst. em plantios puros e mistos em região de clima temperado (STÄNGLE et al., 2017). Portanto, ainda não há consenso sobre os fatores do ambiente que são determinantes para a espessura das cascas das árvores nas florestas tropicais, em que novos estudos são necessários (PAINE et al., 2010; JONES et al., 2019). O efeito do ambiente no volume individual das árvores não foi investigado nas florestas naturais do Brasil. Portanto, é recomendado que novas investigações sejam realizadas para elucidar quais fatores são determinantes na diferenciação da forma do fuste entre diferentes tipos de floresta e regiões geográficas (VIBRANS et al., 2015a).

Diante das preocupações atuais com as mudanças climáticas, os estudos do efeito do ambiente na alometria das árvores têm se preocupado em prever alterações nas alometrias e suas consequências para os estoques florestais. Essas previsões são baseadas em possíveis

cenários globais de mudança do clima, previstos conforme o Painel Intergovernamental para Mudanças do Clima (IPCC). Em um gradiente de floresta boreal no Leste do Canadá, foi verificado que as modificações na forma e no volume dos fustes das árvores ocasionadas pelas mudanças do clima podem induzir alterações de 3 a 4% na biomassa individual das árvores (SCHNEIDER et al., 2017). Além disso, foi constatado que as alterações nas alometrias são menores em locais mais propensos a inundação e em espécies mais tolerantes à sombra. Esses autores concluem que não considerar as alterações na forma do fuste com as mudanças do clima pode ter implicações para as estimativas futuras da biomassa florestal. No território Francês, o aumento da temperatura média causado pela mudança do clima pode afetar o suprimento em volume de espécies comerciais até o final do século XXI (FORTIN et al., 2019), devido ao efeito negativo sobre a altura total das árvores. No entanto, esses autores ressaltam que essas perdas podem ser parcialmente compensadas, por modificações nos fatores de forma e na distribuição das espécies.

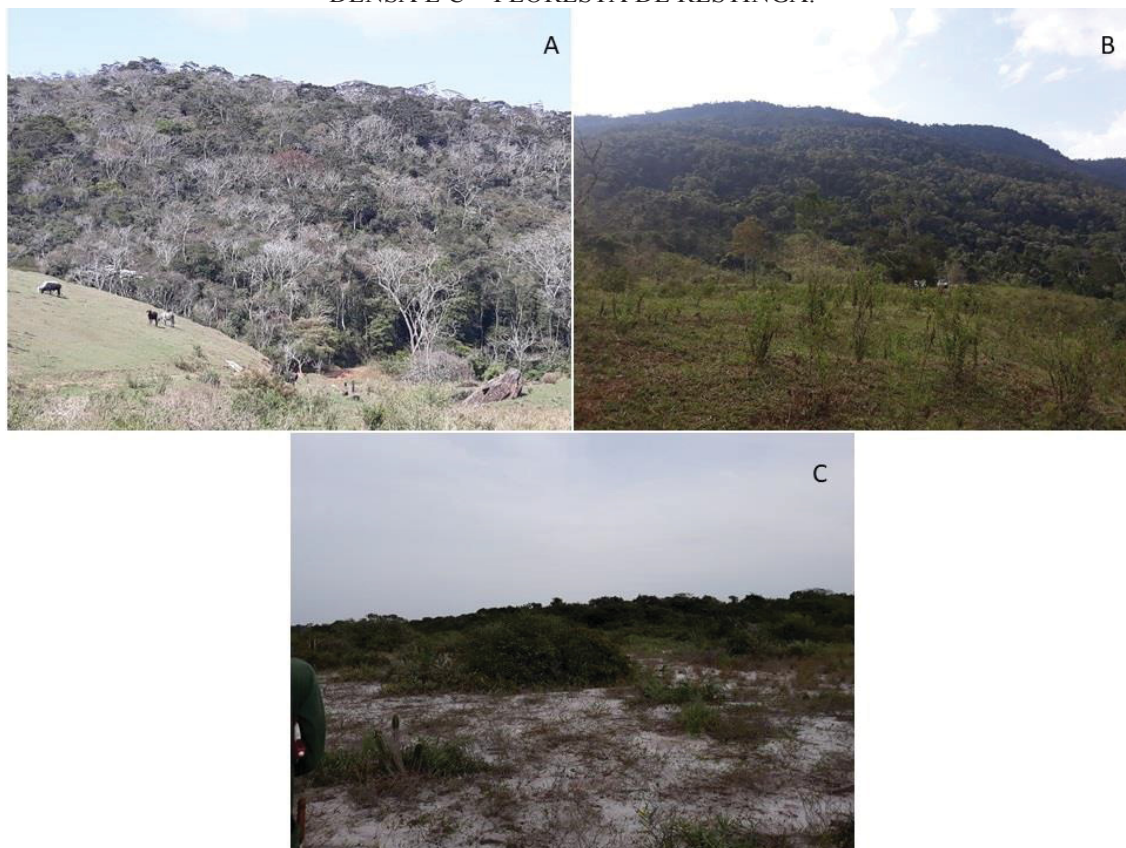
3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCAL DE ESTUDO E COLETA DE DADOS

A área de estudo abrangeu as três principais tipologias florestais do domínio da Mata Atlântica no estado do Rio de Janeiro (FIGURA 1), sendo: Floresta Estacional Semidecidual, Floresta Ombrófila Densa e Restinga Arborizada (IBGE, 2012). Essas tipologias cobrem 98% da área do estado (SFB, 2018), em altitudes que variam de 5 a 900 m. De acordo com a classificação de Köppen, o clima varia de Tropical (Af, Am e Aw) a Subtropical Úmido (Cfa, Cfb, Cwa e Cwb), com predomínio dos climas Aw - Tropical com Inverno Seco e Cwa - Subtropical com Verão Quente. Assim, a temperatura média anual varia de 12 a 24°C e a precipitação anual total de 1.000 a 2.200 mm (ALVARES et al., 2014). Na Tabela 1 estão descritas as principais características dendrométricas, estruturais e climáticas das três tipologias florestais amostradas, considerando os dados coletados no IFN-RJ e no presente estudo.

A Floresta Ombrófila Densa (FOD) cobre 69% da área florestal do estado (SFB, 2018), ocupando desde as planícies litorâneas às regiões serranas com influência do Atlântico (COELHO et al., 2017). Suas principais características são os elevados índices de pluviosidade associados a distribuição regular da chuva ao longo do ano (IBGE, 2012). A Floresta Estacional Semidecidual (FES) se estende por 27% da cobertura florestal e ocupa principalmente as regiões à sotavento da Serra do Mar, caracterizadas pela menor precipitação e estação seca bem definida (IBGE, 2012; SFB, 2018). Essa tipologia apresenta uma área de proteção reduzida e fragmentada em relação a FOD, com poucos fragmentos florestais inseridos em Unidades de Conservação (REZENDE et al., 2015; COELHO et al., 2017). Por outro lado, a Floresta de Restinga (RES) ocupa as planícies costeiras em substratos arenosos, pobres em nutrientes e sujeitos a inundação (SCARANO, 2002; MAGNAGO et al., 2013; SILVA et al., 2016), com menor precipitação média em relação as demais tipologias (SILVA & DEREZYNSKI, 2014). Notadamente, as diferenças geoclimáticas entre essas tipologias condicionam a distinção dessas florestas quanto à composição florística (OLIVEIRA FILHO & FONTES, 2000; NETTESHEIM et al., 2010) e estrutura horizontal (TABELA 1).

FIGURA 1 - VISTA PANORÂMICA DAS PRINCIPAIS TIPOLOGIAS FLORESTAIS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, EM QUE: A = FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL, B = FLORESTA OMBRÓFILA DENSE E C = FLORESTA DE RESTINGA.



FONTE: O autor (2020).

Com base nas unidades amostrais alocadas pelo Inventário Florestal Nacional do estado do Rio de Janeiro (IFN-RJ), foram selecionados os fragmentos florestais para a realização da cubagem das árvores. Assim, foram visitados 31 pontos de amostragem (FIGURA 2), incluindo 18 Unidades de Conservação e áreas particulares de diferentes categorias (ANEXO 1). Nestes pontos, foram cubados um total de 583 fustes e 172 copas. As amostras foram distribuídas em 85 espécies e 29 famílias botânicas, classificadas de acordo com o APG IV (THE ANGIOSPERM PHOLOGY GROUP, 2016) e apresentadas em ordem de abundância no Apêndice 1. Desse total, seis espécies foram amostradas nas três tipologias, 17 exclusivamente na FES, 21 na FOD e 15 na RES.

Conforme a recomendação de Jara et al. (2015), em todos os indivíduos arbóreos amostrados, o voucher botânico foi coletado para identificação e tombamento no herbário RBR do Departamento de Botânica da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. As espécies arbóreas foram identificadas por meio de coleções de referência do herbário RBR e também por consulta a especialistas. A ortografia, os sinônimos e as questões taxonômicas foram verificadas e padronizadas usando o TROPICOS (BOYLE et al., 2013).

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DENDROMÉTRICAS, ESTRUTURAIS E CLIMÁTICAS DAS TRÊS TIPOLOGIAS FLORESTAIS AMOSTRADAS NO PRESENTE ESTUDO.

Fonte	Atributos	FES	FOD	RES
IFN-RJ	Cobertura Florestal (%)	27	69	2
	Área amostrada (ha)	16,77	19,14	5,81
	Espécies amostradas*	949	1470	309
	Densidade Média (ár.v./ha)	554,86	635,37	671,43
	Área Basal Média (m ² /ha)	17,02	23,94	11,4
	Diâmetro Médio (cm)	16,9 (10–161)	18,25 (10–116,3)	9,5 (5–85)
	Altura Média (m)	11,4 (1,5–39,1)	11,8 (1,5–39,9)	5,4 (0,7–26,8)
Este Estudo	Número de amostras	209	253	110
	Espécies amostradas	47	51	25
	Altitude Média (m.s.n.m.)	473 (16–848)	305 (22–898)	15 (2–24)
	Diâmetro Médio (cm)	25,6 (10,7–64)	26,0 (10,8–76,1)	21,3 (11,0–56,1)
	Altura Média (m)	17,8 (9,4–33,7)	18,45 (7,9–32,5)	13,7 (8,7–21,4)
1	Temperatura Média Anual (°C)	12,5–32	8–32	15,5–30,5
	Precipitação Média Anual (mm)	750–1,500	1,250–3,000	750–1,250

*considerando as morfoespécies com identificação incompleta, ¹Silva & Dereczynski (2014) e Sobral et al. (2018).

Para a seleção das árvores cubadas, foi utilizada uma amostragem em três níveis. O primeiro contemplou as principais tipologias florestais da Mata Atlântica presentes no estado em cobertura (FES, FOD e Restinga). O segundo nível abrangeu as principais espécies em termos de densidade e frequência, com base na análise da estrutura horizontal dos dados do IFN-RJ. O terceiro foi referente à distribuição diamétrica das florestas e principais espécies amostradas no IFN-RJ, o que orientou o dimensionamento amostral do segundo nível, seguindo uma relação de proporcionalidade. Essa seleção visou abranger a variabilidade morfológica das árvores, contemplando diferentes arquiteturas e tamanhos.

FIGURA 2 - LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS UNIDADES AMOSTRAIS INSTALADAS PELO IFN-RJ E DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM DAS ÁRVORES CUBADAS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO.



FONTE: O autor (2020).

3.1.1 Método não-destrutivo de cubagem

O método de escalada foi utilizado para cubagem não-destrutiva das árvores e obtenção do volume de madeira. Nesse método, as medidas de diâmetro ao longo do fuste e da copa foram realizadas nas árvores em pé, com auxílio de técnicas de escalada arbórea e equipamentos apropriados para ascensão (FIGURA 3) que não geram danos físicos (LAMMAN, 1995; DE CASTILHO et al., 2006), excluindo a necessidade de derrubada da árvore. Esse método é uma alternativa de cubagem de árvores visando dados para o ajuste de equações de volume (GIMENEZ et al., 2017), principalmente na Mata Atlântica, onde existem limitações legais para o corte de árvores nativas (BRASIL, 2006).

FIGURA 3 - MÉTODO NÃO-DESTRUTIVO DE CUBAGEM DE ÁRVORES EM PÉ, EM QUE: A = CUBAGEM DE FUSTE COM USO DA ESCADA, B = CUBAGEM DE FUSTE COM EQUIPAMENTOS DE ESCALADA, C = CUBAGEM DE COPAS COM EQUIPAMENTOS DE ESCALADA E D = ADAPTAÇÃO DA METODOLOGIA COM DOIS MENSURADORES PARA CUBAGEM DE ÁRVORES DE GRANDE PORTE.



FONTE: O autor (2020).

3.1.2 Volume do fuste

Para obtenção do volume do fuste, foram cubadas 583 árvores, sendo 264 na Floresta Ombrófila Densa, 209 na Floresta Estacional Semidecidual e 110 na Restinga, distribuídas em 84 espécies (APÊNDICE 2). Dessas árvores, foram coletadas as variáveis dendrométricas: diâmetro à altura do peito (*dap*), altura do fuste (*hf*) e os diâmetros (*di*) nas alturas: 0,3 m; 0,5 m; 1 m; 1,3 m; 2 m e a partir desta secção a cada 1 m até a última seção do tronco no ponto de inversão morfológica das árvores. Os volumes das seções foram calculados pelo método de

Smalian (AVERY & BURKHART, 2015), onde o somatório de todas as seções correspondeu ao volume do fuste (v_f).

3.1.3 Volume total

Para obtenção do volume total, foram cubadas 172 copas das árvores amostradas para obtenção do volume do fuste, sendo 78 na Floresta Ombrófila Densa, 57 na Floresta Estacional Semidecidual e 37 na Restinga, distribuídas em 61 espécies (APÊNDICE 2). Dessas 172 árvores, além das variáveis do volume do fuste mencionadas anteriormente, foram mensuradas a altura total (ht) e o volume da copa (vc). Para cubagem da copa, os galhos foram classificados quanto à ramificação principal e mensurados individualmente. Assim, todos os galhos foram medidos até o diâmetro limite de 5 cm. Cada galho foi seccionado a cada 1 m ou em seções irregulares (comprimento < 1 m) até o limite de diâmetro estabelecido. O volume dos galhos foi calculado pelo método de Smalian, enquanto o somatório do volume de todos os galhos correspondeu ao volume da copa. Por fim, o volume total da árvore (vt) foi obtido pelo somatório dos volumes do fuste e da copa.

3.1.4 Relação hipsométrica

Do total de árvores cubadas para obtenção do volume, foram utilizadas 572 para modelagem da relação altura \times diâmetro, sendo 253 na Floresta Ombrófila Densa, 209 na Floresta Estacional Semidecidual e 110 na Restinga, distribuídas em 83 espécies. Dessas, foram mensurados os diâmetros à altura do peito (dap) e a altura total (ht). Assim, a altura total da árvore foi definida como a distância vertical medida do solo até a folha viva de maior altura (SCARANELLO et al., 2012). A mensuração da altura total foi realizada com auxílio de uma trena de medição e do clinômetro de precisão *Haglöf Sweden ECII-R*. Esse equipamento possui exatidão de 0,2°, ângulo de resolução de 0,1° e altura de resolução de 0,1 m.

3.1.5 Espessura da casca

A casca é a cobertura mais externa do caule de plantas lenhosas, formada por um complexo de tecidos localizados fora do câmbio vascular, que inclui células vivas e mortas (PAUSAS, 2015). A espessura da casca foi medida em todas as árvores cubadas para obtenção do volume do fuste (3.1.2). As cascas foram medidas com martelos de incremento (*Haglöf*

Sweden), conforme Paine et al. (2010). Assim, foram realizadas duas medidas, nos sentidos Norte e Sul, obtendo-se uma média que corresponde ao valor da espessura da casca das árvores. Conforme a recomendação de Hoffman et al. (2003), para as espécies com casca fissurada, as medições foram feitas nos cumes e não nas cavidades da casca.

3.2 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

Anterior ao ajuste dos modelos volumétricos e hipsométricos, foi realizada a análise exploratória dos dados com objetivo de identificar a correlação, a dispersão e a distribuição das variáveis utilizadas para as modelagens. Essa análise visou maximizar o conhecimento sobre o conjunto de dados de grande variabilidade, sendo apropriada quando os efeitos dos tratamentos não são aparentes (ELLISON, 1993). A análise foi realizada para o conjunto total de dados, que correspondeu aos dados genéricos, bem como para cada subconjunto representados pelos dados por tipologia florestal e para as principais espécies madeireiras.

Para isso, foram construídos gráficos exploratórios no programa computacional R 3.5.2 (R CORE TEAM, 2019) com auxílio dos pacotes *ggplot2* (WICKHAM, 2006) e *GGally* (SCHLOERKE et al., 2018) e da função *ggpairs*. O tamanho ótimo de amostra (n) foi calculado para todos conjuntos e subconjuntos de dados por meio da fórmula tradicional para populações infinitas, considerando o limite de erro de 10% e o nível de probabilidade de 95% (VON GADOW, PUKKALA & TOMÉ, 2000).

3.3 MODELAGEM DO VOLUME

3.3.1 Ajuste e seleção dos modelos volumétricos

Após a investigação das relações entre as variáveis, quatro modelos tradicionais da literatura florestal foram testados para o ajuste das equações de volume (TABELA 2). Esses modelos foram selecionados em ensaios preliminares de ajuste, dentre 12 modelos de volume lineares e não lineares. Portanto, foram escolhidos devido à facilidade de ajuste e replicação e à qualidade de ajuste superior aos demais. Os modelos foram ajustados em sua forma linear, por meio da transformação logarítmica das variáveis, para estimativa dos volumes do fuste e total das árvores. Esses modelos foram ajustados para a base de dados genérica e para os subconjuntos específicos, os quais corresponderam as três principais tipologias florestais (FES, FOD e RES) e as quatro principais espécies madeireiras no estado (*Apuleia leiocarpa* (Vogel)

J. F. Macbr.; *Astronium graveolens* Jacq.; *Miconia cinnamomifolia* (DC.) Naudin; *Pseudopiptadenia contorta* (DC.) G. P. Lewis & M. P. Lima). As espécies selecionadas estão entre as mais importantes na estrutura das florestas no estado do Rio de Janeiro (SFB, dados não publicados) e devido as suas propriedades anatômicas, apresentam potencial madeireiro (NASCIMENTO et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2018). Devido a quantidade limitada de unidades amostrais disponíveis para todas espécies (APÊNDICE 1), optou-se por ajustar apenas os modelos para estimativa do volume do fuste.

TABELA 2 – MODELOS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS PARA O AJUSTE DAS EQUAÇÕES DE VOLUME.

Número	Autor	Modelo de volume	Entrada
1	Kopecky & Gehrhardt	$\ln(v) = \beta_0 + \beta_1 \ln(dap^2) + \varepsilon_i$	Simples
2	Brenac	$\ln(v) = \beta_0 + \beta_1 \ln(dap) + \beta_2 (1/dap) + \varepsilon_i$	
3	Spurr modificado	$\ln(v) = \beta_0 + \beta_1 \ln(dap^2 \cdot h) + \varepsilon_i$	Dupla
4	Schumacher & Hall	$\ln(v) = \beta_0 + \beta_1 \ln(dap) + \beta_2 \ln(h) + \varepsilon_i$	

v = volume (m^3), dap = diâmetro medido à altura do peito (cm), h = altura (m) e ε_i = erro aleatório associado ao modelo.

O menor erro padrão da estimativa (SEE%), menor valor do critério de informação de Akaike (AIC) e o maior coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) foram os critérios estatísticos utilizados para a seleção das melhores equações (AKINDELE & LEMAY, 2006; VIBRANS et al., 2015a; KRAINOVIC et al., 2017). Essas estatísticas foram recalculadas para as variáveis em sua escala original, devido a estrutura dos modelos testados. O viés nas estimativas causado pela transformação reversa da escala logarítmica para a escala original foi corrigido por meio do fator de correção (Eq. 1) proposto por Baskerville (1972).

$$FC = e^{\left(\frac{MSE}{2}\right)} \quad (1)$$

Em que: FC= fator de correção; MSE= erro quadrado médio da regressão.

A análise dos resíduos foi considerada como critério determinante para a seleção das equações (BENNETT et al., 2013) e para a verificação do atendimento aos pressupostos da regressão linear (DRAPER & SMITH, 1998). A normalidade dos resíduos foi verificada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (RAZALI & WAH, 2011), com o auxílio do pacote *nortest* (GROSS e LIGGES, 2015), ao passo que o teste de Breusch-Pagan foi utilizado para avaliação da homocedasticidade (BREUSCH & PAGAN, 1979). Todos os testes de hipótese usados consideraram $\alpha = 0,01$.

Os resíduos gerados pelas melhores equações foram analisados pelo gráfico de dispersão dos resíduos estudatizados pelos valores observados e pelo gráfico quantil-quantil a 95% de probabilidade. O fator de inflação da variância (VIF) foi calculado com objetivo de identificar possíveis problemas com multicolinearidade das variáveis preditoras nos modelos múltiplos (SILESHI, 2014). Para isso, foi assumido como limite de corte $VIF \geq 10$. A significância dos coeficientes da regressão foi avaliada pelo teste t ($\alpha = 0,01$).

A influência dos valores discrepantes (*outliers*) foi analisada para os modelos de melhor ajuste. Para isso, foi aplicada a análise gráfica dos resíduos estudatizados em função dos pontos de alavanca (*leverages*), considerando os pesos da Distância de Cooks para cada observação por meio do pacote *car* (FOX & WEISBERG, 2018).

3.3.2 Validação dos modelos e avaliação da hipótese

Para validar os modelos selecionados foi aplicada a validação cruzada *leave-one-out* (MAUYA et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2018), com o auxílio do pacote *caret* (KUNH et al., 2018) no programa R. Nesse procedimento cada observação foi removida por vez e o modelo ajustado com o restante dos dados ($n - 1$). Em seguida, o modelo ajustado foi validado em relação à observação removida e o erro associado à essa previsão foi registrado. Esse processo foi repetido para todas as observações das bases de dados (n). Por fim, foi calculado o erro geral de previsão por meio da média dos erros de validação registrados para cada observação. Como critérios para a validação dos modelos, foram consideradas as estatísticas da raiz do erro médio quadrático (RMSE), erro médio absoluto (MAE) e coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$), conforme Sileshi (2014). Adicionalmente, os volumes estimados pelas equações foram plotados pelos volumes observados (JARA et al., 2015) na escala original da variável dependente, para identificação de viés nas estimativas.

O teste de aderência de Qui-quadrado (χ^2) foi utilizado para testar as hipóteses sobre as estimativas geradas pelas equações genéricas e específicas por tipologia e por espécie ($\alpha = 0,01$). Para isso, o teste de Wilcoxon não-paramétrico bicaudal (V) para dados pareados foi aplicado para verificar a existência de diferença significativa entre essas estimativas ($\alpha = 0,01$). Para comparar as estimativas das equações genéricas e específicas com os valores reais observados ($\alpha = 0,01$), foi aplicado o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis (H). Para verificar a concordância entre os valores estimados pelas equações, o Índice de Concordância de Willmott (dw) foi calculado (WILLMOTT, 1981) com auxílio do pacote *hydroGOF*

(ZAMBRANO-BIGIARINI, 2017). Esse índice varia de 0 a 1, em que o valor máximo indica perfeita concordância entre pares de valores.

A variação da raiz do erro médio quadrático (RMSE) e do coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) foi calculada para comparar a precisão e a eficiência das equações genéricas em relação as específicas. Assim, as equações selecionadas foram comparadas em duas situações: 1) equações genéricas em relação as específicas por tipologia florestal, visando a estimativa dos volumes do fuste e total; e 2) equação genérica em relação as específicas por espécie madeireira para estimativa do volume do fuste.

3.4 MODELAGEM DA RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA

3.4.1 Ajuste e seleção dos modelos hipsométricos

Para o ajuste das equações hipsométricas, foram testados quatro modelos tradicionais (TABELA 3), sendo dois com transformação logarítmica das variáveis e dois com as variáveis em sua forma natural. Assim como os modelos de volume, esses modelos foram selecionados em ensaios preliminares, dentre 10 modelos hipsométricos tradicionais lineares e não lineares. Semelhante a modelagem do volume (3.3), os modelos foram ajustados para a base de dados genérica e para os subconjuntos específicos, os quais corresponderam as três principais tipologias florestais (FES, FOD e RES) e as quatro principais espécies madeireiras do estado (*Apuleia leiocarpa* (Vogel) J. F. Macbr.; *Astronium graveolens* Jacq.; *Miconia cinnamomifolia* (DC.) Naudin; *Pseudopiptadenia contorta* (DC.) G. P. Lewis & M. P. Lima).

TABELA 3 – MODELOS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS PARA O AJUSTE DAS EQUAÇÕES HIPSOMÉTRICAS.

Número	Autor	Modelo hipsométrico	Variáveis
1	Trorey	$h = \beta_0 + \beta_1.(dap) + \beta_2.(dap^2) + \varepsilon_i$	Natural
2	Naslund	$h = 1,3 + (dap^2 / (\beta_0 + \beta_1.(dap^2))) + \varepsilon_i$	
3	Stoffels	$\ln(h) = \beta_0 + \beta_1.\ln(dap) + \varepsilon_i$	Transformada
4	Curtis	$\ln(h) = \beta_0 + \beta_1.(1/dap) + \varepsilon_i$	

dap = diâmetro medido à altura do peito (cm), h = altura (m) e ε_i = erro aleatório associado ao modelo.

Para o ajuste, seleção e validação das equações, foram utilizados os mesmos critérios estatísticos e os procedimentos adotados no tópico anterior, Modelagem do Volume (3.3). No entanto, o processo de validação cruzada foi aplicado para todos os modelos ajustados.

3.4.2 Avaliação da hipótese

Para avaliar as hipóteses elaboradas, as alturas estimadas pela equação genérica foram comparadas com as estimadas pelas equações específicas por tipologia e espécie. Essa comparação foi realizada por meio do teste de aderência de Qui-quadrado (χ^2) e pelo teste de Wilcoxon não-paramétrico bicaudal para dados pareados (V). As estimativas geradas por essas equações foram simultaneamente comparadas com os valores reais ($\alpha = 0,01$) por meio do teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis (H). Para melhor visualização do desempenho das equações, gráficos foram elaborados para comparar as curvas de regressão dos ajustes gerados pela equação genérica em relação as específicas. Esses gráficos visaram aprimorar a compreensão sobre as possíveis tendências nas estimativas.

Para testar o efeito das tipologias florestais (variável categórica) sobre a altura total das árvores (variável dependente), dois modelos lineares foram construídos, em que, no primeiro, foi inserido o efeito aditivo, ao passo que no segundo, a interação com as diferentes tipologias foi considerada. Assim, conhecida a relação alométrica da altura em função do diâmetro das árvores (LI et al., 2015), o diâmetro foi utilizado como covariável para construção do modelo e seu efeito foi controlado. A significância dos coeficientes da regressão obtidos para cada variável preditora foi testada para avaliar os efeitos das tipologias sobre a relação $h \times d$. Essa abordagem foi baseada nos modelos lineares selecionados como os mais adequados neste estudo. Adicionalmente, a análise gráfica foi usada para complementar a visualização da interação entre as variáveis.

O efeito do tamanho da árvore, das tipologias florestais e das espécies sobre os modelos para estimativa da altura das árvores foram testados por meio de modelos lineares de efeito misto (MLEM) (ZUUR et al., 2009; MENSAH et al., 2018). Para analisar a variabilidade da altura nos níveis de tipologia e de espécie, esses fatores foram introduzidos como efeitos aleatórios nos MLEM (KEARSLEY et al., 2017). Para isso, três MLEM foram construídos considerando o diâmetro como efeito fixo. No primeiro, as tipologias foram especificadas como efeito aleatório do modelo. Para o segundo, as espécies foram consideradas como efeitos aleatórios. Por fim, no terceiro modelo, a covariável de maior importância para a explicação da variável de resposta foi inserida como efeito fixo em conjunto com o diâmetro, considerando a covariável restante como efeito aleatório.

O AIC e o RMSE foram utilizados para comparação dos modelos (BURNHAM & ANDERSON, 2002; KEARSLEY et al., 2017). Adicionalmente, os R^2 condicional (variância explicada por todos os efeitos) e marginal (variância explicada pelos efeitos fixos) foram

calculados para os MLEM (NAKAGAWA & SCHIELZETH, 2013). Os MLEM foram ajustados por meio do pacote *lme4* (BATES et al., 2015) e se basearam no melhor modelo genérico selecionado neste estudo para descrição da relação $h \times d$ (KEARSLEY et al., 2017; MENSAH et al., 2018).

3.5 EFEITO DOS FATORES AMBIENTAIS NAS RELAÇÕES ALOMÉTRICAS

Para as análises desse tópico, foram utilizadas as 572 árvores da base de dados para ajuste dos modelos hipsométricos (3.1.4). Essas árvores foram selecionadas devido a mensuração completa de todas as variáveis alométricas de interesse, descritas no Apêndice 3. Devido a afinidade biológica existente entre as variáveis, foram investigadas as relações alométricas do diâmetro (cm) com a altura total (ht), com a espessura da casca (ec) e com o volume do fuste (vf) das árvores, considerando todas as tipologias florestais e espécies.

3.5.1 Variáveis ambientais

Por meio de bases de dados globais, foram obtidas as informações edáficas e climáticas para a localização geográfica de cada um dos 31 pontos de amostragem visitados no presente estudo. As variáveis climáticas foram extraídas do *WorldClim*, uma superfície climática interpolada para áreas terrestres globais, com resolução espacial de 30 arc segundos, aproximadamente 1 km (HIJMANS et al., 2005). As variáveis edáficas foram extraídas do *SoilsGrid*, um sistema que fornece previsões globais de propriedades numéricas de padrões do solo em diferentes profundidades, com resolução espacial de 250 m (HENGL et al., 2017). Para atender os objetivos propostos, foram extraídas todas as covariáveis presentes nas bases de dados citadas, sendo seis edáficas e 19 climáticas (TABELA 4), que notadamente apresentam efeitos na estrutura das florestas e na alometria das árvores em largas escalas.

As relações entre as variáveis alométricas e as covariáveis ambientais foram investigadas por meio da Análise de Múltiplos Fatores (MFA). A MFA é um método de ordenação multivariada semelhante a Análise de Componentes Principais (PAGÈS, 2002). A vantagem da MFA é que as variáveis são separadas em grupos, que recebem o mesmo peso na análise (BARALOTO et al., 2011), independentemente do número de variáveis. Além disso, permite inserir grupos ilustrativos de variáveis para explorar seus relacionamentos na ordenação, sem que haja influência sobre o processo de ordenação (BARALOTO et al., 2011). Nesse sentido, o grupo de variáveis alométricas foi inserido como variável de suporte e seu

efeito na ordenação foi apenas ilustrativo. Assim, é possível explorar seu relacionamento com as covariáveis ambientais ordenadas. Devido a intensa variação entre as unidades de medida, todas as variáveis foram padronizadas quanto à escala. Essa análise foi realizada por meio do pacote *FactoMineR* no Programa R (LE et al., 2008).

TABELA 4 – COVARIÁVEIS CLIMÁTICAS E EDÁFICAS EXTRAÍDAS PARA A LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS ÁRVORES MENSURADAS.

ID	Variável	Fonte
bio_1	Temperatura média anual	
bio_2	Variação diurna média	
bio_3	Isotermalidade	
bio_4	Sazonalidade da temperatura	
bio_5	Temperatura máxima do mês mais quente	
bio_6	Temperatura mínima do mês mais frio	
bio_7	Amplitude térmica anual	
bio_8	Temperatura média do trimestre mais úmido	
bio_9	Temperatura média do trimestre mais seco	
bio_10	Temperatura média do trimestre mais quente	WordClim
bio_11	Temperatura média do trimestre mais frio	
bio_12	Precipitação anual	
bio_13	Precipitação do mês mais chuvoso	
bio_14	Precipitação do mês mais seco	
bio_15	Sazonalidade da precipitação	
bio_16	Precipitação do trimestre mais chuvoso	
bio_17	Precipitação do trimestre mais seco	
bio_18	Precipitação do trimestre mais quente	
bio_19	Precipitação do trimestre mais frio	
cec.avg	Capacidade de troca catiônica	
clay.avg	Fração de Argila	
sand.avg	Fração de Areia	SoilsGrid
silt.avg	Fração de Silte	
ph.avg	pH	
c.avg	Teor de carbono orgânico	

Em que: as variáveis destacadas em negrito foram usadas para o teste dos efeitos ambientais.

Com base nos resultados da MFA, foram selecionadas as covariáveis climáticas e edáficas representativas da variação do conjunto de dados. Devido à alta correlação entre as variáveis ambientais e aos objetivos propostos no presente estudo, a seleção das covariáveis também foi baseada no conhecimento de seus efeitos nas relações alométricas relatados na literatura e descritos nos próximos parágrafos. Assim, foram escolhidas quatro covariáveis que descrevem o clima e quatro que descrevem os solos, destacadas na TABELA 4. Em seguida, essas covariáveis foram incorporadas na modelagem das variáveis alométricas, para examinar até que ponto o clima e o solo explicam as variações das relações alométricas (BARALOTO et al., 2011).

Os efeitos da precipitação e de temperatura média anual sobre a alometria das árvores foram constatados em diversas regiões do mundo (FELDPAUSCH et al., 2011; BANIN et al., 2012; CHAVE et al., 2015; HULSOFF et al., 2015; FORTIN et al., 2019). Por isso, esses efeitos são fundamentais para entendimento e modelagem da relação alométrica das árvores em escalas geográficas, visando principalmente a construção de modelos genéricos para extensas regiões. Neste estudo, além da precipitação e da temperatura, foram investigados os efeitos da sazonalidade dessas variáveis. A sazonalidade climática é um dos principais fatores ambientais que distinguem os tipos florestais da Mata Atlântica, com nítido gradiente em relação a altitude e distância do mar (OLIVEIRA-FILHO & FONTES, 2000; NETTESHEIM et al., 2010; BERGAMIN et al., 2012; BERTONCELO et al., 2012; IBGE, 2012). Além disso, a sazonalidade da precipitação e da temperatura representam importantes variáveis para estimativas espaciais em larga escala do volume de madeira (SILVEIRA et al., 2019).

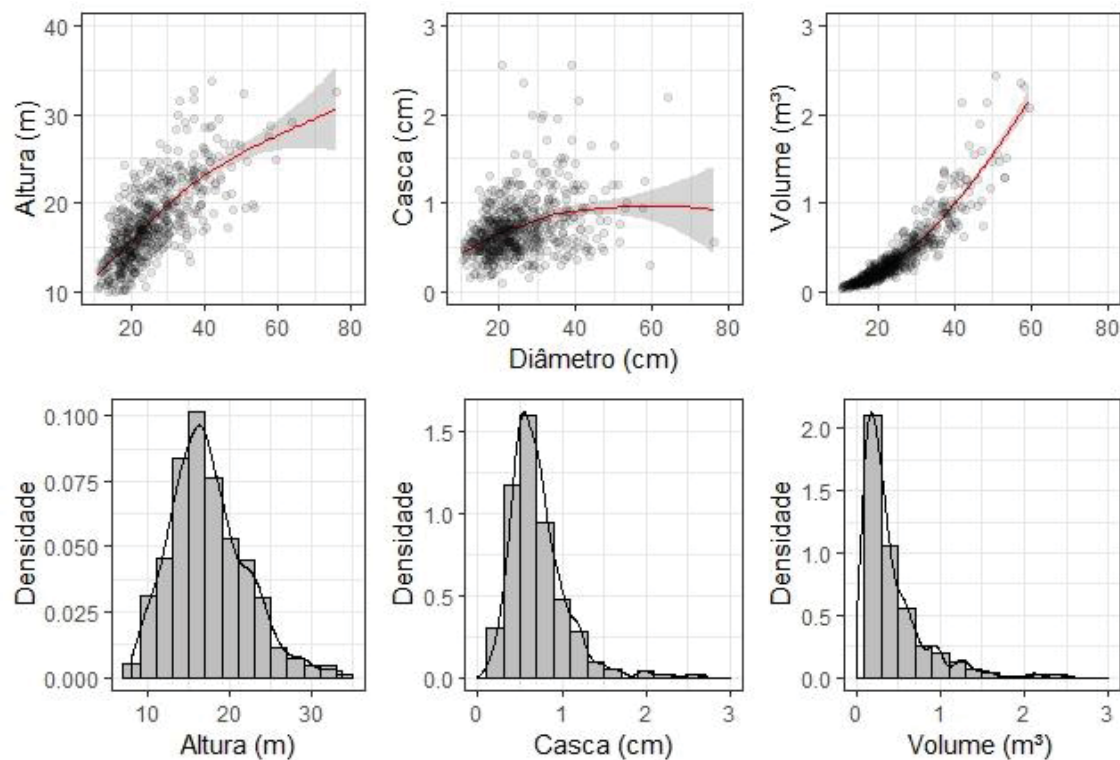
No mesmo sentido, alterações na alometria das árvores foram constatadas entre solos pobres e ricos em nutrientes (URBAN et al., 2013), que exercem efeitos até mesmo na espessura da casca das árvores (JONES et al., 2019). Para uma espécie de palmeira no sudeste do Brasil, a acidez do solo e a saturação por bases, são determinantes em sua alometria e definem sua forma de crescimento e arquitetura (MIOLA & FERNANDES, 2015). No entanto, poucos estudos foram desenvolvidos para compreensão do efeito do solo sobre a relação alométrica das árvores, o que motivou a investigação do presente estudo. O efeito dos solos foi investigado e constatado em relação aos estoques de biomassa e carbono em regiões tropicais (PAOLI et al., 2008; BARALOTO et al., 2011; MARSHALL et al., 2012; ROITMAN et al., 2018). Na Amazônia, foi verificada a diminuição dos estoques de biomassa com o aumento da fertilidade do solo em diferentes escalas geográficas (BARALOTO et al., 2011). Na região do Cerrado no Brasil Central, os teores de argila e areia apresentam efeitos significativos sobre a variação do estoque aéreo de biomassa (ROITMAN et al., 2018). Como consenso, os atributos químicos e físicos do solo são importantes preditores dos estoques florestais e podem aprimorar essas estimativas em escalas geográficas.

3.5.2 Seleção das covariáveis e ajuste dos modelos alométricos geoclimáticos

Nos tópicos anteriores (3.3 e 3.4) foi constatado que os modelos lineares sem transformação das variáveis não atenderam aos pressupostos da regressão linear ($\alpha = 0,01$). Como o objetivo deste tópico foi compreender as relações entre as variáveis alométricas e ambientais em seus estados naturais, elas não foram transformadas. Como alternativa para a

modelagem das relações, foram ajustados modelos lineares generalizados (GLM's). Esses modelos permitem modelar uma ampla gama de dados com diferentes tipos de variáveis resposta (FARAWAY, 2006), excluindo a suposição básica da normalidade das variáveis ou dos erros (MACLEOD, 2010). Devido à assimetria na distribuição das variáveis alométricas de resposta (FIGURA 4), a família *Gamma* foi usada para o ajuste dos GLM's (FARAWAY, 2006). Para evitar a presença de valores negativos nas respostas dos modelos e para transformação dos erros, foi utilizada a função de ligação *log*.

FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO DAS VARIÁVEIS ALOMÉTRICAS USADAS PARA O TESTE DOS EFEITOS DO AMBIENTE E AJUSTE DOS GLM'S.



FONTE: O autor (2020).

Nesse sentido, a regressão linear generalizada foi usada para a seleção das covariáveis ambientais com potencial de explicação das variáveis alométricas de resposta (h , ec e v) e ajuste dos modelos alométricos geoclimáticos. As variáveis climáticas geralmente apresentam alta colinearidade, em que a maioria das abordagens estatísticas preditivas exige a seleção de apenas uma, dentre as variáveis fortemente correlacionadas (BRAUNISCH et al., 2013). Essas variáveis inflam as variâncias dos coeficientes de regressão, inviabilizando os testes de hipótese para significância dos parâmetros estimados e os intervalos de confiança gerados. Por isso, foi adotado um processo de seleção baseado na multicolinearidade e na significância das covariáveis, dividido em quatro etapas.

Na primeira etapa, foram ajustados modelos empíricos para as três variáveis alométricas de resposta em função do diâmetro e de todas as covariáveis ambientais (TABELA 4). Para reduzir a intercorrelação e analisar a covariância entre as variáveis preditivas, foram considerados o coeficiente de correlação de Pearson – r e o Fator de Inflação de Variância – VIF (ZUUR et al., 2010; MARSHALL et al., 2012). Para isso, foi usado a função *stepVIF* do pacote *pedometrics* (SAMUEL-ROSA, 2020), adotando um limite de corte de $VIF > 10$ (HAIR et al., 1995) e $R > 0,7$ (MARSHALL et al., 2012).

Após a exclusão das covariáveis infladas, as covariáveis restantes foram usadas para ajustar os modelos cheios, na segunda etapa do processo. A significância dos coeficientes foi verificada para as covariáveis aplicadas nos modelos cheios. Assim, foram excluídas todas as covariáveis não significativas, considerando nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Após a exclusão das covariáveis não significativas, as restantes compuseram os modelos finais, que foram novamente avaliados na terceira etapa do processo quanto à significância ($\alpha = 0,05$) e a covariância das variáveis. Na quarta etapa, a análise de variância (ANOVA) foi aplicada para comparar a semelhança dos modelos cheios com os modelos finais (ROUDER et al., 2016), em termos de explicação das variáveis alométricas de resposta.

Para examinar a qualidade e a consistência dos ajustes dos GLM's, foram calculados os valores do pseudo R^2 , do critério de informação de Akaike (AIC), do critério de informação Bayesiano (BIC) e da máxima verossimilhança (FARAWAY, 2006; SALINAS-MELGOZA et al., 2018). Esses valores foram utilizados para compreender a evolução dos modelos finais em explicação total da variância e perda de informação (Li et al., 2015). Esses valores também foram utilizados para comparar o ganho de informação dos modelos geoclimáticos (GLM's finais), em relação aos modelos alométricos simples (GLM's em função apenas do dap).

A adequação dos modelos foi verificada por meio dos gráficos de envelopes simulados para os resíduos criados no pacote *hnp* (MORAL, HINDE e DEMÉTRIO, 2017), com 999 simulações e intervalo de confiança de 95%. Para um bom modelo ajustado, espera-se que os resíduos estejam dispersos aleatoriamente entre os limites dos envelopes. Os ajustes dos modelos generalizados foram realizados no *software* R 3.5.2, por meio da função *glm* (R CORE TEAM, 2018).

Após a seleção dos modelos geoclimáticos finais e verificação da consistência estatística e biológica, os coeficientes alométricos (coeficiente por covariável) foram analisados quanto a magnitude. A magnitude desses coeficientes, descreve a relação biológica existente entre as covariáveis preditivas e as variáveis alométricas de resposta, aprimorando o entendimento dos efeitos do clima e do solo na alometria das árvores. Assim, a covariável

preditora exerce efeito positivo sobre a variável de resposta para coeficientes alométricos positivos (+), que descrevem a relação biológica diretamente proporcional. O efeito negativo e a relação inversamente proporcional são descritos por coeficientes alométricos negativos (-).

Para melhorar a visualização e o entendimento das relações biológicas entre as variáveis em toda extensão dos dados, as variáveis alométricas de resposta foram plotadas em função de cada covariável ambiental selecionada. Para isso, foi mantida a mesma estrutura de GLM usada para os modelos geoclimáticos, no entanto, as covariáveis ambientais foram analisadas independentemente. Os gráficos foram construídos por meio do pacote *visreg* (BREHENY & BURCHETT, 2017), mantendo as variáveis e covariáveis em sua escala original.

3.5.3 Efeitos dos ambientes na alometria das árvores

Notadamente, na Mata Atlântica, a alometria das árvores é afetada pelo efeito dos diferentes tipos florestais e vegetacionais (SCARANELLO et al., 2012; VIBRANS et al., 2015b). Para verificar a presença de evidências de efeito dos diferentes ambientes na relação alométrica das árvores, as variáveis alométricas de resposta foram plotadas em função da principal variável independente (dap), considerando as tipologias florestais, os tipos de vegetação e a posição sociológica das árvores como fatores distintos. As tipologias florestais envolvem um gradiente pluviométrico das paisagens na Mata Atlântica, definido principalmente pela duração da estação seca (NETTESHEIM et al., 2010; IBGE, 2012; EISENLOHR & OLIVEIRA-FILHO, 2014). Neste estudo, foram consideradas como tipologias: a Floresta Ombrófila Densa (FOD) e Floresta Estacional Semidecidual (FES). Por apresentar condições ambientais contrastantes com essas florestas, a Restinga Florestada (RES) foi considerada como a terceira tipologia florestal.

As classes altitudinais caracterizam os tipos de vegetação, considerando a classificação contida em IBGE (2012) para a faixa de latitude do presente estudo. Desse modo, são classificados como: restingas (florestas localizadas nas planícies costeiras arenosas), terras-baixas (florestas localizadas de 0 a 100 m.n.m, com exceção das restingas), sub-montana (florestas localizadas de 100 a 500 m.n.m) e montana (florestas localizadas de 500 a 900 m.n.m). Na Mata Atlântica do sudeste do Brasil, notadamente as maiores altitudes são marcadas por menores temperaturas (KORNER, 2007; SOUSA NETO et al., 2010). Esse gradiente afeta significativamente a estrutura das florestas e as relações alométricas das árvores (ALVES et al., 2010; SCARANELLO et al., 2012; REZENDE et al., 2015).

A posição sociológica corresponde ao estrato vertical que a copa da árvore ocupa dentro da floresta (BAKER & WILSON, 2000). Nesse sentido, pode ser classificada como: de sub-bosque (presente no estrato inferior da floresta), intermediária (presente no estrato médio da floresta) e de dossel (localizada no estrato superior da floresta ou acima deste estrato, de forma emergente). Visivelmente, a posição vertical da árvore na floresta está relacionada com a sua disponibilidade de luz, que afeta diretamente seu estabelecimento e crescimento (WHITMORE, 1989). Para as espécies arbóreas tropicais, a demanda por luz exerce efeito significativo em diversas características alométricas, causando grande variação na plasticidade das espécies (ROZENDAAL et al., 2006). De modo geral, a maior competição por luz gera maior investimento no crescimento em altura das árvores (HOFFMAN et al., 2003). Assim, as relações alométricas podem apresentar variações interespecíficas entre as árvores do estrato inferior, do dossel e emergentes, sugerindo respostas distintas das espécies à disponibilidade de luz (ALVES & SANTOS, 2002).

Para aprimorar o conhecimento acerca desses efeitos, foram construídos GLM's categóricos para explicar as três variáveis alométricas de resposta em função da interação do diâmetro com os fatores (variáveis categóricas): tipologias florestais (FES, FOD e RES), tipos de vegetação (montana, sub-montana, restinga e terras-baixas) e posição sociológica das árvores (dossel, intermediária e sub-bosque), que representam os diferentes ambientes. Nesse sentido, as interações da variável independente (dap) com os fatores foram analisadas quanto a grandeza e a significância ($\alpha = 0,05$). Os modelos categóricos foram examinados quanto a qualidade e a consistência dos ajustes por meio dos critérios estatísticos mencionados no tópico anterior (pseudo R^2 , AIC e L).

Em busca de uma elucidação ecológica para as diferenças entre as alometrias em escalas geográficas, os valores das interações (coeficientes alométricos por fator) foram comparados com as características ambientais de cada ambiente analisado, representadas pelos valores médios das covariáveis edáficas e climáticas (TABELA 5). Assim, essa análise foi realizada apenas para as tipologias florestais e tipos de vegetação.

TABELA 5 – VALORES MÉDIOS PARA AS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E EDÁFICAS NAS TIPOLOGIAS FLORESTAIS E TIPOS DE VEGETAÇÃO PREDOMINANTES NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO.

Covariável		Ambiente					
		Tipologia Florestal			Tipo de Vegetação		
		FES	FOD	RES	Montana	Sub-montana	Terras-baixas
Climáticas	Temperatura (°C)	21,58	19,99	23,00	20,50	20,14	21,58
	Sazonalidade (°C)	2,08	2,10	1,90	2,14	2,15	1,99
	Precipitação (mm)	1278,7	1450,5	1067,6	1383,4	1449,5	1276,2
	Sazonalidade (mm)	66,30	58,58	40,84	66,31	63,37	54,57
Edáficas	Areia (%)	47,94	48,82	55,88	45,90	48,62	51,63
	Argila (%)	35,51	32,66	26,66	36,19	33,90	30,88
	CTC	10,68	11,34	21,97	10,50	11,02	11,85
	pH	5,28	5,13	5,30	5,12	5,18	5,31

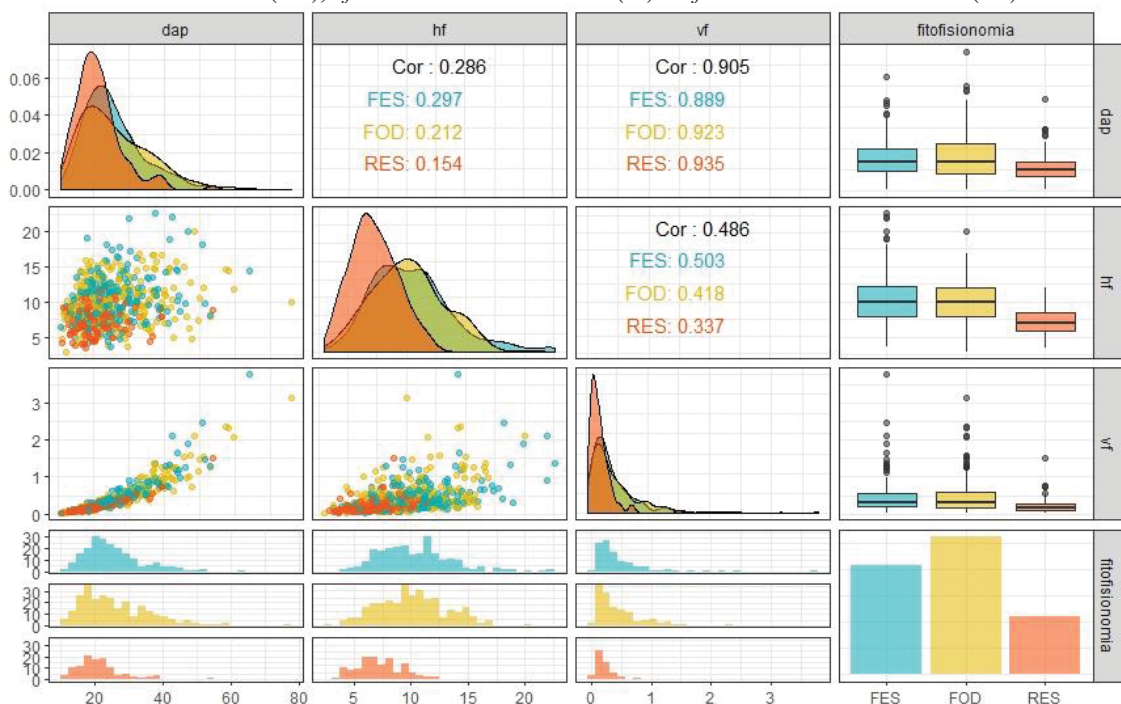
4. RESULTADOS

4.1 MODELOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME

4.1.1 Análise exploratória dos dados

A análise exploratória dos dados evidenciou ampla variação na distribuição e dispersão das variáveis dendrométricas ao longo das tipologias florestais (FIGURAS 5 e 6). No entanto, a distribuição das variáveis foi semelhante entre as tipologias FES e FOD. Para a RES, os dados estão concentrados nas menores classes e com menor amplitude de variação, distinguindo-se das demais tipologias. O diâmetro e as alturas do fuste e total apresentaram distribuição unimodal, notando maior assimetria positiva para a variável diâmetro, enquanto os volumes do fuste e total mostraram tendência à distribuição decrescente.

FIGURA 5 – ANÁLISE EXPLORATÓRIA DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS NA ESTIMATIVA DO VOLUME DO FUSTE PARA AS TIPOLOGIAS FLORESTAIS. EM QUE: *dap*: DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO (cm), *hf*: ALTURA DO FUSTE (m) E *vf*: VOLUME DO FUSTE (m³).

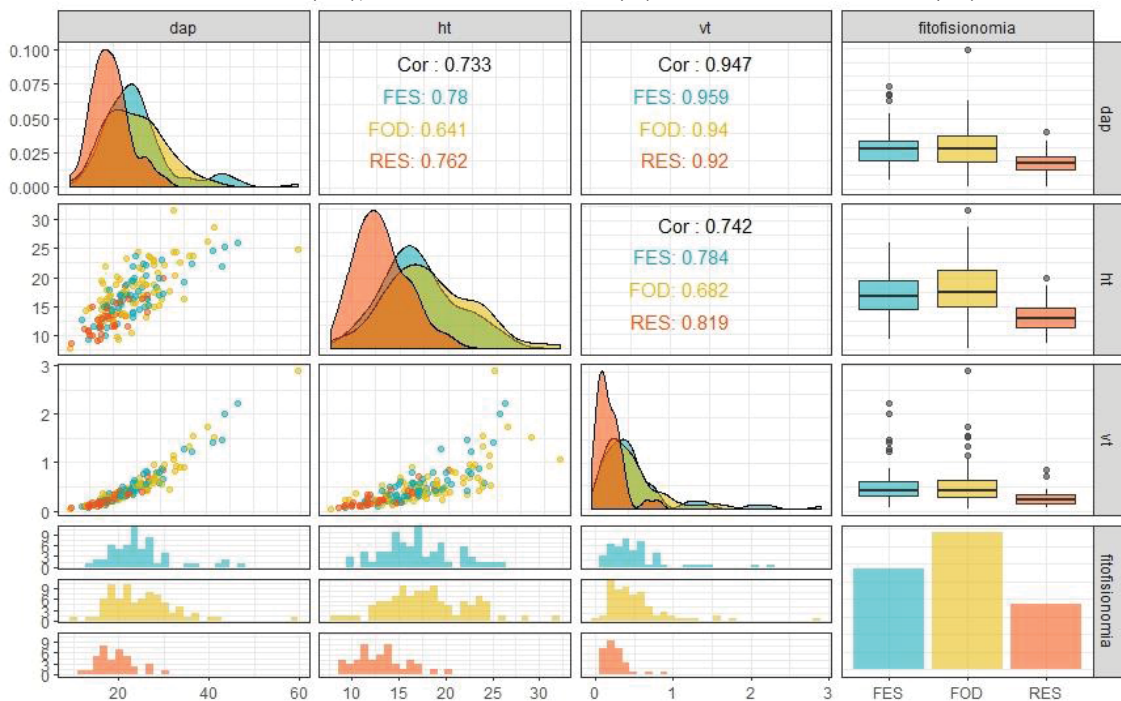


FONTE: O autor (2020).

As variáveis predictoras usadas para calibração das equações de volume total (*dap* e *ht*) apresentaram maior correlação com a variável resposta (*vt*), em comparação com as variáveis para o volume do fuste (*dap*, *hf* e *vf*). Considerando a correlação entre as variáveis predictoras,

o aumento foi mais expressivo, de 0,28 ($dap \times hf$) para 0,73 ($dap \times ht$). A dispersão entre as variáveis evidenciou um padrão similar para as relações dendrométricas ($dap \times ht$ e $dap \times vt$) nas tipologias FES e FOD. Essa similaridade pode ser observada pela sobreposição da dispersão das variáveis nessas duas tipologias, tanto para o volume do fuste (FIGURA 5) quanto para o total (FIGURA 6). Para a RES, a dispersão das observações se concentrou nas menores classes das variáveis, com reduzida amplitude de variação. Nessa tipologia, as relações dendrométricas foram mais uniformes, apresentando menor variabilidade em relação as demais tipologias.

FIGURA 6 - ANÁLISE EXPLORATÓRIAS DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS NA ESTIMATIVA DO VOLUME TOTAL PARA AS TIPOLOGIAS FLORESTAIS. EM QUE: *dap*: DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO (cm), *ht*: ALTURA TOTAL (m) E *vt*: VOLUME TOTAL (m³).

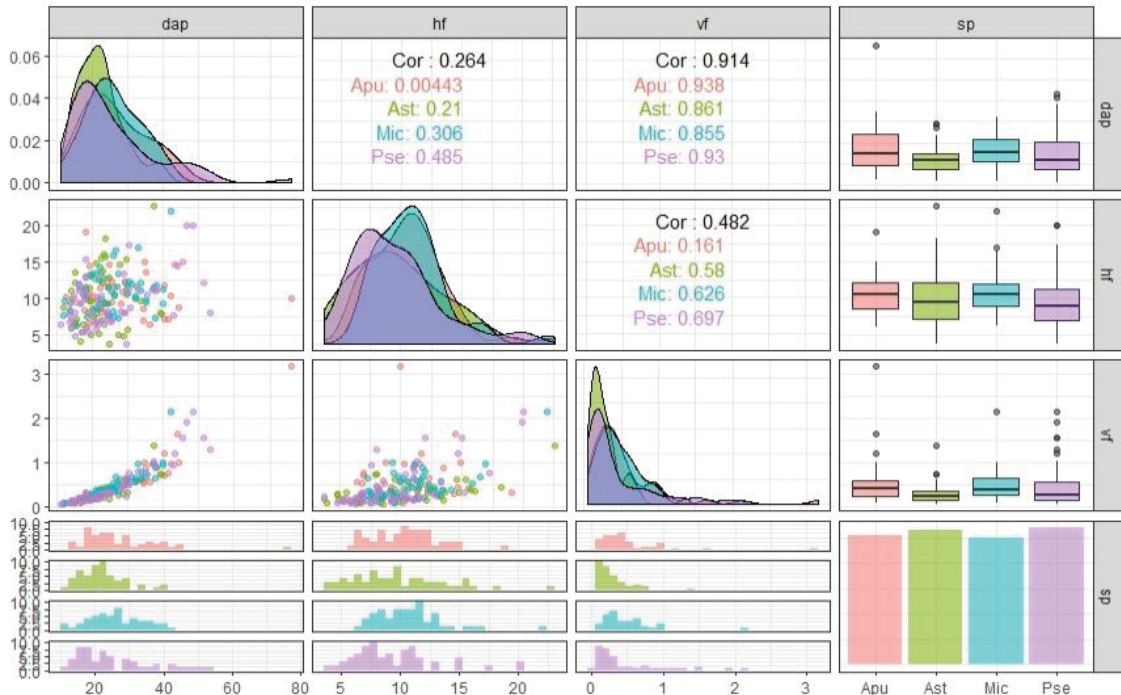


FONTE: O autor (2020).

Para as espécies madeireiras, a análise exploratória evidenciou distribuições similares das variáveis diâmetro, altura do fuste e volume do fuste (FIGURA 7). As características dendrométricas da espécie *Apuleia leiocarpa* apresentaram maior semelhança com *Miconia cinnamomifolia*, enquanto *Astronium graveolens* foi mais similar a *Pseudopiptadenia contorta*. As variáveis preditoras (*dap* e *hf*) apresentaram correlação de moderada a alta (*dap*: 0,83-0,93; *hf*: 0,16-0,69) com a variável resposta (*vf*). Com exceção da espécie *A. leiocarpa*, que mostrou fraca correlação entre as variáveis *dap* x *hf* (0,004) e *ht* x *vf* (0,161). No entanto, esta espécie apresentou a maior correlação entre o diâmetro e o volume do fuste (0,938). A dispersão entre

as variáveis reforçou a similaridade das relações dendrométricas entre as espécies analisadas (FIGURA 7).

FIGURA 7 – ANÁLISE EXPLORATÓRIA DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS NA ESTIMATIVA DO VOLUME DO FUSTE PARA AS PRINCIPAIS ESPÉCIES MADEIREIRAS. EM QUE: *dap*: DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO (cm), *hf*: ALTURA DO FUSTE (m) E *vf*: VOLUME DO FUSTE (m³).



FONTE: O autor (2020).

Após a transformação logarítmica das variáveis, foi constatado o aumento da correlação entre as variáveis predictoras e resposta. A transformação tornou a dispersão dessas variáveis linear e reduziu a presença de valores discrepantes nas distribuições. Essas constatações nortearam a escolha dos modelos lineares com variáveis logaritmizadas para o ajuste das equações. Cabe ressaltar que a transformação não alterou os padrões observados para a distribuição e dispersão das variáveis dendrométricas entre as tipologias florestais e espécies madeireiras.

4.1.2 Tipologias Florestais

Na TABELA 6 estão apresentados os resultados de todos os ajustes e os respectivos critérios utilizados para a seleção das equações. O modelo 4 apresentou o melhor ajuste (menor AIC) para a estimativa do volume do fuste em todas as ocasiões. Para a estimativa do volume total, o modelo 3 gerou os melhores ajustes em todas as ocasiões. Esses modelos geraram

estimativas mais precisas (menor SEE) e elevada aderência aos dados (maior $R^2_{aj.}$), com coeficientes da regressão significativos ($\alpha \leq 0,01$).

TABELA 6 - PARÂMETROS DE AJUSTE E PRECISÃO DOS MODELOS TESTADOS PARA ESTIMATIVA DOS VOLUMES DO FUSTE E TOTAL NAS TIPOLOGIAS FLORESTAIS.

Dados	Modelo	β_0	SE_{β_0}	β_1	SE_{β_1}	β_2	SE_{β_2}	SEE%	$R^2_{adj.}$	AIC	VIF
Volume do Fuste											
Genérico	1	-8,375**	0,098	1,131**	0,015			36,46	0,865	-550	-
	2	-7,198**	0,601	1,982**	0,144	-6,568*	3,308	35,41	0,872	-583	21,60
	3	-9,359**	0,052	0,952**	0,006			17,09	0,971	-1433	-
	4	-9,341**	0,041	2,053**	0,012	0,734**	0,012	14,81	0,978	-1599	1,09
FES	1	-8,416**	0,168	1,144**	0,026			34,59	0,873	-184	-
	2	-8,326**	1,053	2,267**	0,251	-0,514 ^{ns}	5,928	34,74	0,872	-182	22,66
	3	-9,418**	0,095	0,957**	0,011			18,48	0,964	-446	-
	4	-9,402**	0,073	2,082**	0,022	0,718**	0,021	14,16	0,979	-557	1,09
FOD	1	-8,070**	0,139	1,087**	0,022			32,96	0,876	-238	-
	2	-5,934**	0,841	1,672**	0,202	-12,06*	4,684	30,72	0,893	-275	21,77
	3	-9,458**	0,078	0,963**	0,009			16,05	0,971	-618	-
	4	-9,329**	0,067	2,033**	0,018	0,756**	0,021	14,45	0,976	-673	1,05
RES	1	-8,360**	0,217	1,101**	0,036			21,48	0,934	-348	-
	2	-7,824**	1,413	2,071**	0,35	-2,726 ^{ns}	7,105	21,14	0,937	-350	23,70
	3	-9,454**	0,113	0,971**	0,014			10,77	0,984	-500	-
	4	-9,414**	0,082	2,077**	0,024	0,739**	0,025	9,37	0,988	-529	1,03
Volume Total											
Genérico	1	-8,988**	0,179	1,277**	0,028			31,48	0,86	-155	-
	2	-6,074**	1,11	1,856**	0,268	-16,013**	6,024	22,77	0,927	-266	22,97
	3	-9,381**	0,149	0,928**	0,016			20,30	0,942	-306	-
	4	-9,370**	0,146	2,038**	0,067	0,720**	0,069	21,73	0,933	-282	2,25
FES	1	-9,130**	0,329	1,304**	0,052			23,39	0,911	-68	-
	2	-3,956 ^{ns}	2,186	1,387*	0,521	-30,05*	12,57	18,36	0,945	-95	27,49
	3	-9,671**	0,291	0,963**	0,032			19,52	0,938	-89	-
	4	-9,621**	0,294	2,073**	0,139	0,780**	0,158	20,30	0,933	-83	2,57
FOD	1	-8,490**	0,278	1,200*	0,043			28,66	0,872	-66	-
	2	-5,968**	1,618	1,799*	0,389	-14,163 ^{ns}	8,955	22,62	0,921	-102	20,37
	3	-9,228**	0,233	0,908*	0,025			18,77	0,945	-132	-
	4	-9,159**	0,229	1,979*	0,086	0,703*	0,093	19,77	0,939	-123	1,71
RES	1	-9,493**	0,426	1,354**	0,072			21,54	0,887	-104	-
	2	-11,23**	3,643	3,149**	0,929	8,184 ^{ns}	17,03	21,95	0,882	-102	40,65
	3	-9,848**	0,344	0,987**	0,041			17,45	0,926	-119	-
	4	-9,849**	0,346	2,089**	0,175	0,853**	0,183	17,67	0,924	-118	2,35

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade, * = significativo ao nível de 5% de probabilidade, e ^{ns} = não significativo, SE= erro padrão dos coeficientes estimados, SEE= erro padrão da estimativa, $R^2_{aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado, AIC= critério de informação de Akaike e VIF= fator de inflação da variância.

A análise residual indicou o atendimento dos pressupostos da regressão linear, tal como normalidade dos resíduos pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) e homocedasticidade pelo teste de Breusch-Pagan (BP), onde as hipóteses de nulidade não foram rejeitadas (p-valor > 0,01). Assim, os modelos 4 e 3 foram selecionados, respectivamente, como os mais adequados para estimativa dos volumes do fuste e total. As equações ajustadas para o volume do fuste

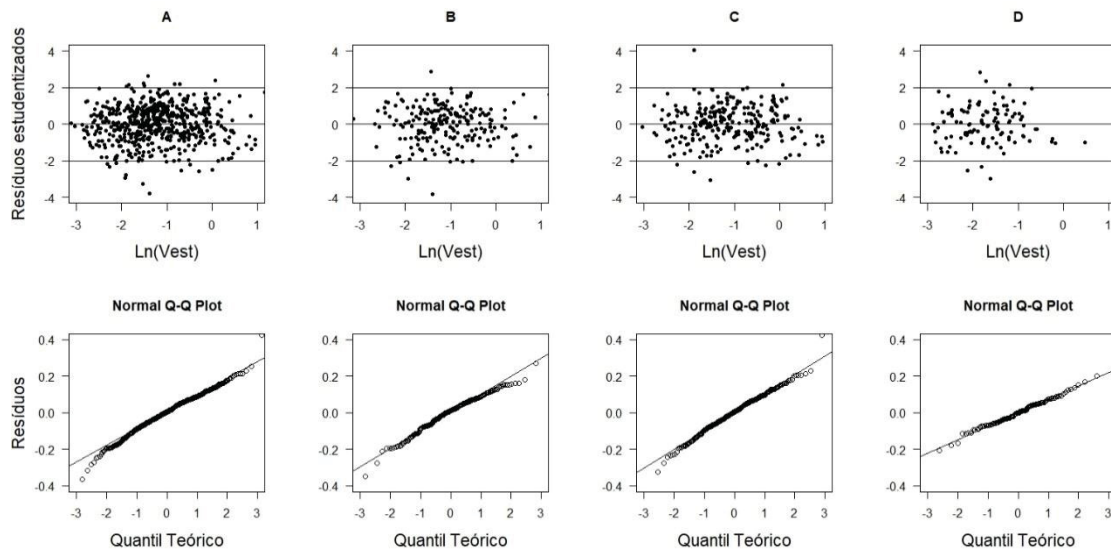
foram mais eficientes (maior $R^2_{aj.}$) que as ajustadas para o volume total, fornecendo estimativas mais precisas (menor SEE).

Os modelos de dupla entrada (3 e 4) apresentaram estatísticas de ajuste, eficiência e precisão superiores aos modelos de simples entrada (1 e 2). O modelo 2 (Brenac) foi o único que apresentou coeficientes de regressão ($\hat{\beta}_i$) com baixa significância ou não significativos (TABELA 6), bem como presença de multicolinearidade, com valor de inflação de variâncias (VIF) maior do que 10. O modelo 1 (Kopezky & Gehrhardt), mesmo gerando erros de estimativa superiores aos demais modelos, apresentou coeficientes de regressão significativos e atendeu os pressupostos da regressão linear, podendo ser utilizado para as estimativas de volume. Em um caso único, o modelo 2 de simples entrada gerou os menores erros de estimativa e o melhor ajuste para o volume total na FES. No entanto, apresentou coeficientes não significativos ($\alpha \leq 0,01$) e inflação das variâncias ($VIF > 10$). Com base nesses critérios, esse modelo foi excluído da seleção.

Os resíduos gerados pelas equações selecionadas apresentaram distribuição uniforme ao longo da faixa de valores estimados e ausência de heterocedasticidade para os volumes do fuste (FIGURA 8) e total (FIGURA 9). A distribuição desses resíduos se adequou à normal teórica, atendendo essa condição para uso da regressão. No entanto, para o volume do fuste, os resíduos gerados pelas equações genéricas (FIGURA 8A) e específicas para FES e FOD (FIGURAS 8B e 8C) apresentaram fuga nos extremos das caudas das distribuições, principalmente nos extremos inferiores das distribuições.

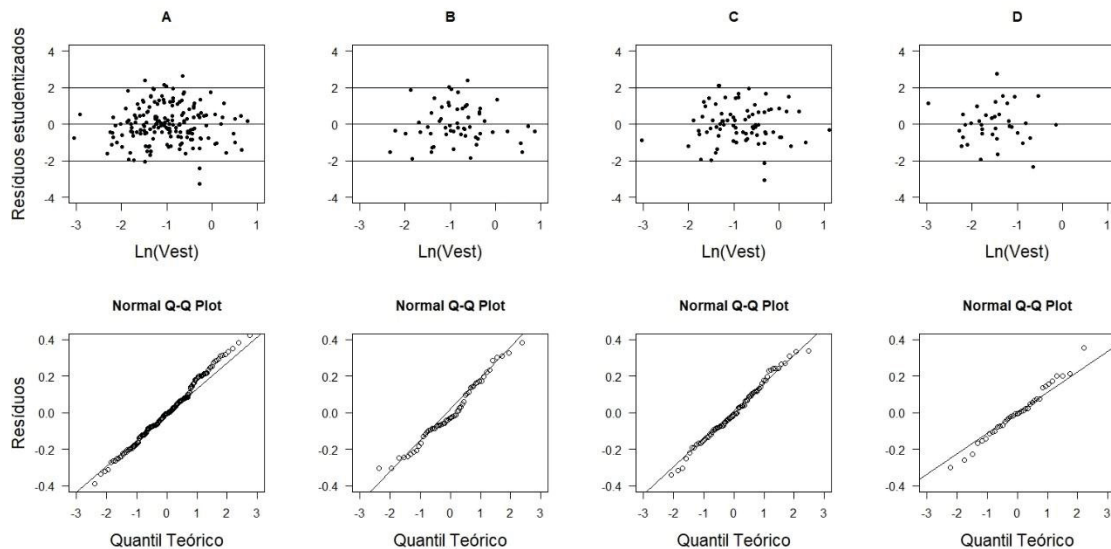
Para a RES (8D), os resíduos gerados pela equação selecionada estão sobrepostos a reta da distribuição normal teórica. Considerando o volume total, um padrão distinto foi observado, em que a fuga dos resíduos foi mais sensível para FES e FOD (9B e 9C), em comparação com a equação para RES (9D) que apresentou desvios mais evidentes nos extremos da distribuição. Para a equação genérica, os resíduos apresentaram desvios mais evidentes no extremo superior da distribuição (9A), ao contrário da equação genérica selecionada para o volume do fuste (8A).

FIGURA 8 – DISPERSÃO DOS RESÍDUOS DOS MODELOS DE MELHOR AJUSTE PARA ESTIMATIVA DO VOLUME DO FUSTE NAS TIPOLOGIAS FLORESTAIS. EM QUE: A (MODELO 4 AJUSTADO PARA OS DADOS GENÉRICOS), B (MODELO 4 AJUSTADO PARA FES), C (MODELO 4 AJUSTADO PARA FOD) E D (MODELO 4 AJUSTADO PARA RES).



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 9 - DISPERSÃO DOS RESÍDUOS DOS MODELOS DE MELHOR AJUSTE PARA ESTIMATIVA DO VOLUME TOTAL NAS TIPOLOGIAS FLORESTAIS. EM QUE: A (MODELO 3 AJUSTADO PARA OS DADOS GENÉRICOS), B (MODELO 3 AJUSTADO PARA A FES), C (MODELO 3 AJUSTADO PARA A FOD) E D (MODELO 3 AJUSTADO PARA RES).

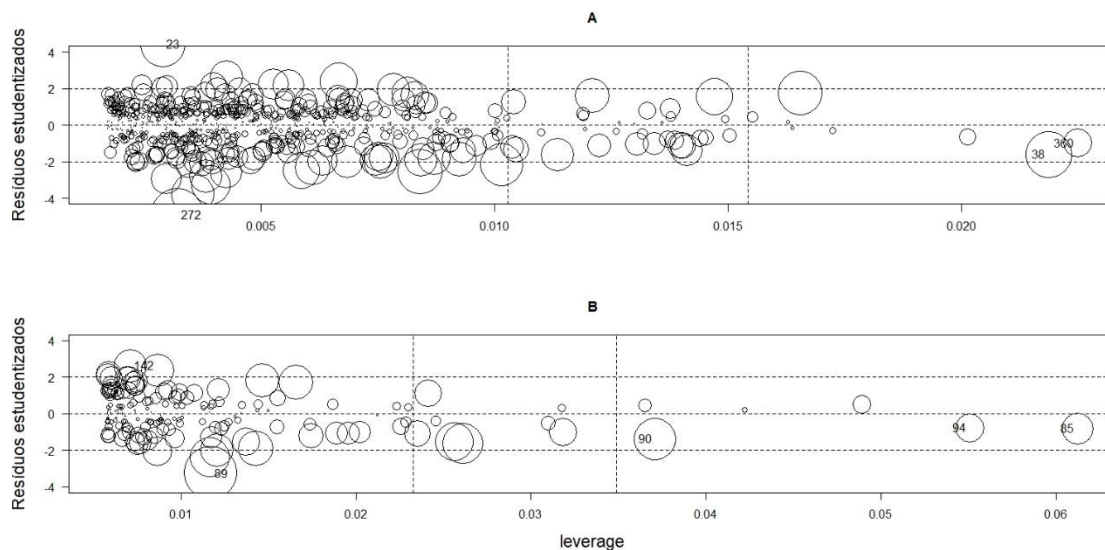


FONTE: O autor (2020).

Todas as equações selecionadas foram submetidas ao teste de detecção de *outliers*, o qual indicou a presença de observações discrepantes com resíduos estudantizados superiores a -2 e 2 e que, no entanto, apresentam pouca contribuição nas estimativas, devido aos baixos valores de *leverage* (FIGURA 10). No entanto, a exclusão dessas observações acarretou em ganho de precisão pouco expressivo, com redução do SEE% inferior a 1% e aumento do R^2_{aj} .

apenas na terceira casa decimal (APÊNDICE 4). Assim, optou-se por manter essas observações na base de dados.

FIGURA 10 – ANÁLISE GRÁFICA DOS RESÍDUOS ESTUDENTIZADOS PARA DETECÇÃO DE *OUTLIERS*. EM QUE: A (EQUAÇÃO GENÉRICA SELECIONADA PARA ESTIMATIVA DO VOLUME DO FUSTE) E B (EQUAÇÃO GENÉRICA SELECIONADA PARA ESTIMATIVA DO VOLUME TOTAL).



FONTE: O autor (2020).

De acordo com os resultados expostos na TABELA 7, as equações selecionadas foram validadas pelo processo de validação cruzada *leave-one-out*. Nas simulações geradas pelo processo de validação, as equações apresentaram elevada eficiência (alto $R^2_{aj.}$) e precisão das estimativas (reduzido MAE e RMSE), garantindo a estabilidade dessas equações. Ademais, as equações selecionadas para RES apresentaram os maiores erros, com MAE superiores a 25% e 40% para os volumes do fuste e total respectivamente.

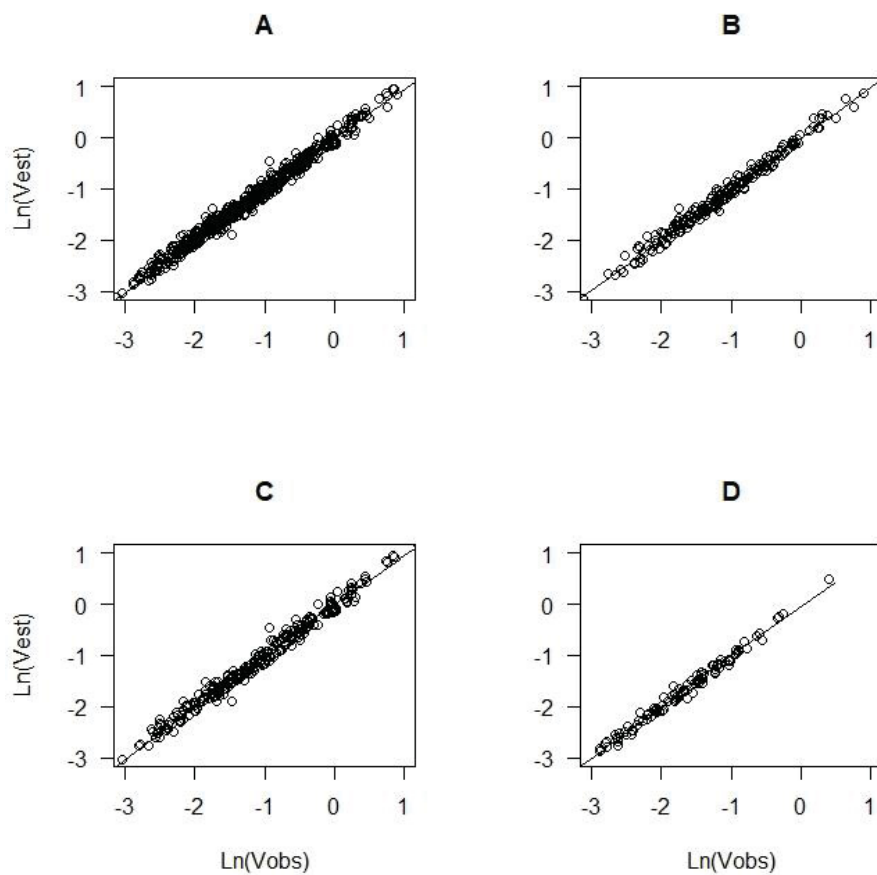
TABELA 7 – ESTATÍSTICAS DE VALIDAÇÃO-CRUZADA DOS MODELOS SELECIONADOS PARA ESTIMATIVA DOS VOLUMES DO FUSTE E TOTAL NAS TIPOLOGIAS FLORESTAIS.

Volume	Dados	Modelo	$R^2_{aj.}$	RMSE	RMSE (%)	MAE	MAE (%)
Fuste	Genérico	4	0,986	0,098	23,70	0,076	18,42
	FES	4	0,984	0,096	21,49	0,076	17,03
	FOD	4	0,984	0,108	23,34	0,084	18,13
	RES	4	0,988	0,074	32,64	0,060	26,21
Total	Genérico	3	0,950	0,162	33,46	0,127	26,14
	FES	3	0,938	0,174	31,56	0,138	25,07
	FOD	3	0,944	0,164	30,27	0,127	23,55
	RES	3	0,935	0,149	56,74	0,115	43,97

$R^2_{aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado, RMSE= raiz do erro quadrático médio e MAE= erro médio absoluto.

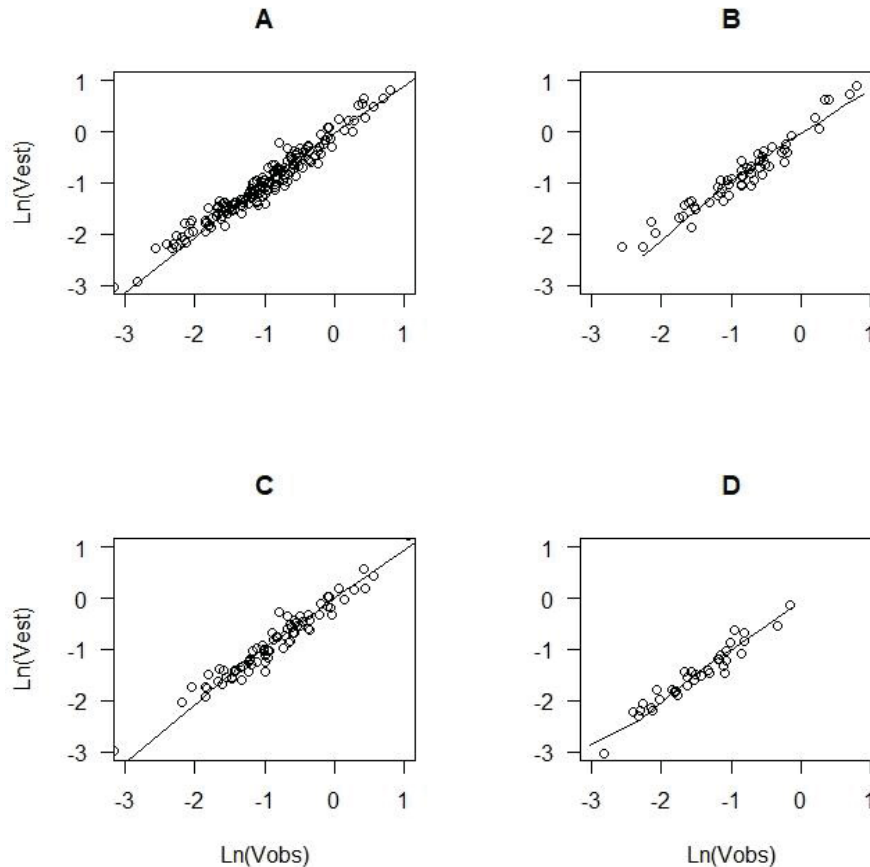
A análise gráfica dos volumes observados pelos estimados no processo de validação indicou boa aderência aos dados e comprovou também a estabilidade das equações. Para o volume do fuste, as observações sobrepuseram à reta de regressão (FIGURA 11). Considerando o volume total, a dispersão dos pontos foi maior (FIGURA 12), refletindo a maior variabilidade dos volumes estimados e observados.

FIGURA 11 – VALIDAÇÃO DOS MODELOS SELECIONADOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME DO FUSTE PELA DISPERSÃO ENTRE VALORES ESTIMADOS E OBSERVADOS. EM QUE: A (MODELO 4 AJUSTADO PARA OS DADOS GENÉRICOS), B (MODELO 4 AJUSTADO PARA FES), C (MODELO 4 AJUSTADO PARA FOD) E D (MODELO 4 AJUSTADO PARA RES).



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 12 – VALIDAÇÃO DOS MODELOS SELECIONADOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME TOTAL PELA DISPERSÃO ENTRE OS VALORES ESTIMADOS E OBSERVADOS. EM QUE: A (MODELO 3 AJUSTADO PARA OS DADOS GENÉRICOS), B (MODELO 3 AJUSTADO PARA FES), C (MODELO 3 AJUSTADO PARA FOD) E D (MODELO 3 AJUSTADO PARA RES).



FONTE: O autor (2020).

4.1.3 Espécies madeireiras

Na TABELA 8 estão apresentados os resultados dos ajustes e os respectivos critérios estatísticos utilizados para a seleção das equações de volume das quatro principais espécies madeireiras. O modelo 3 (Spurr modificado) apresentou o melhor ajuste, eficiência e precisão para as espécies *A. leiocarpa* e *M. cinnamomifolia*, enquanto o modelo 4 (Schumacher & Hall) foi selecionado como o mais adequado para *A. graveolens* e *P. contorta*. A análise residual indicou que os pressupostos de normalidade dos resíduos (teste KS) e homocedasticidade (teste BP) não foram rejeitados (p -valor $> 0,01$). Assim como observado para as tipologias florestais, os modelos de dupla entrada forneceram estimativas mais precisas e eficientes do que os de simples entrada, em que a inserção da variável altura acarretou em erro (SEE%) quatro vezes menor para *A. graveolens* e aumento em 24% da explicação da variabilidade do seu volume ($R^2_{aj.}$).

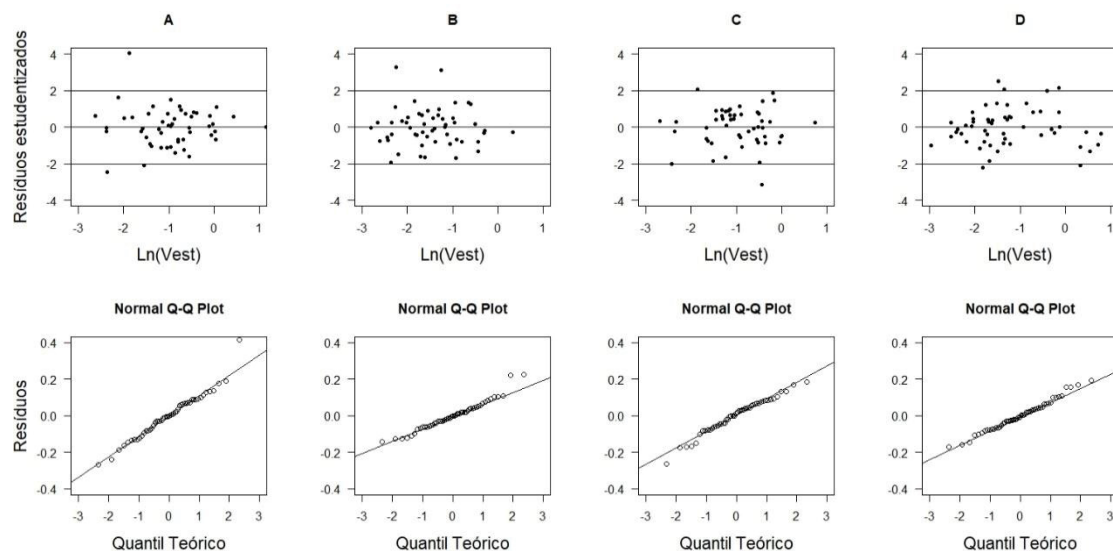
TABELA 8 - PARÂMETROS DE AJUSTE E PRECISÃO DOS MODELOS TESTADOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME DO FUSTE DAS ESPÉCIES PRINCIPAIS MADEIREIRAS.

Espécie	Modelo	β_0	SE β_0	β_1	SE β_1	β_2	SE β_2	SEE%	R ² _{adj.}	AIC	VIF
<i>Apuleia leiocarpa</i>	1	-7,661**	0,278	1,032**	0,042			29,09	0,909	-45	-
	2	-4,642**	1,519	1,363**	0,356	-18,053*	8,938	26,71	0,923	-53	18,55
	3	-9,551**	0,192	0,976**	0,022			9,43	0,990	-160	-
	4	-9,231**	0,173	2,026**	0,039	0,732**	0,054	12,53	0,983	-130	1,00
<i>Astronium graveolens</i>	1	-8,452**	0,444	1,137**	0,072			39,26	0,758	-76	-
	2	-8,332**	3,507	2,244**	0,862	-0,623 ^{ns}	18,06	39,63	0,753	-74	34,83
	3	-9,255**	0,206	0,931**	0,025			15,92	0,960	-172	-
	4	-9,529**	0,125	2,115**	0,038	0,706**	0,027	8,13	0,990	-242	1,03
<i>Miconia cinnamomifolia</i>	1	-8,002**	0,306	1,094**	0,047			34,14	0,777	-36	-
	2	-6,524**	2,040	1,833**	0,494	-7,962 ^{ns}	10,86	35,22	0,763	-32	26,89
	3	-9,322**	0,161	0,951**	0,018			10,29	0,980	-156	-
	4	-9,201**	0,147	1,993**	0,041	0,776**	0,050	11,10	0,976	-147	1,10
<i>Pseudopitadenia contorta</i>	1	-8,374**	0,270	1,131**	0,043			36,42	0,888	-39	-
	2	-9,280**	1,795	2,475**	0,425	5,126 ^{ns}	10,05	37,35	0,882	-36	24,50
	3	-9,124**	0,135	0,928**	0,016			18,40	0,971	-113	-
	4	-9,096**	0,099	2,004**	0,032	0,703**	0,035	13,07	0,986	-149	1,20

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade, * = significativo ao nível de 5% de probabilidade, e ^{ns} = não significativo, SE= erro padrão dos coeficientes estimados, SEE= erro padrão da estimativa, R²_{aj.}= coeficiente de determinação ajustado, AIC= critério de informação de Akaike e VIF= fator de inflação da variância.

Os resíduos gerados pelas equações selecionadas para as espécies apresentaram distribuição uniforme ao longo da faixa de valores estimados (FIGURA 13). Uma leve heterocedasticidade foi observada nos resíduos gerados para *A. leiocarpa* (9A), significativa pelo teste BP (TABELA 8). A distribuição dos resíduos gerados se adequou à distribuição normal teórica (FIGURA 13), atendendo a condição para uso da regressão linear por mínimos quadrados ordinários. No entanto, para as duas espécies mencionadas acima, foram observados valores discrepantes (*outliers*) nos extremos superiores de suas distribuições de resíduo. Cabe ressaltar que a exclusão desses valores não trouxe ganho de precisão para as equações. Logo, foram mantidos nos ajustes, por representar valores reais das populações amostradas.

FIGURA 13 – DISPERSÃO DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MODELOS DE MELHOR AJUSTE PARA ESTIMATIVA DO VOLUME DO FUSTE DAS PRINCIPAIS ESPÉCIES MADEIREIRAS. EM QUE: A (MODELO 3 AJUSTADO PARA *Apuleia leiocarpa*), B (MODELO 4 AJUSTADO PARA *Astronium graveolens*), C (MODELO 3 AJUSTADO PARA *Miconia cinnamomifolia*) E D (MODELO 4 AJUSTADO PARA *Pseudopiptadenia contorta*).



FONTE: O autor (2020).

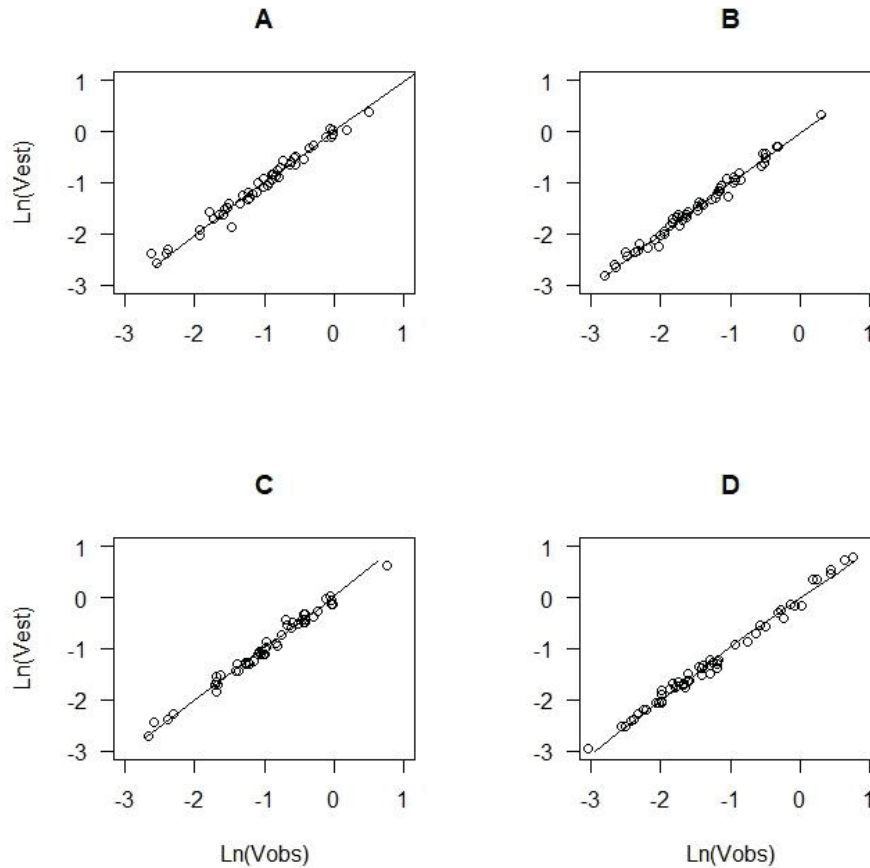
Na TABELA 9 estão apresentados os resultados obtidos na validação das equações selecionadas para as espécies, cujas estimativas foram precisas e eficientes, com $R^2_{aj.}$ superior a 97%, RMSE inferior a 28% e MAE menor do que 20%. A análise gráfica dos volumes observados pelos estimados (em escala logarítmica) no processo de validação cruzada *leave-one-out* indicou boa aderência e estabilidade das equações para as espécies (FIGURA 14), corroborando a seleção pelos critérios estatísticos.

TABELA 9 – ESTATÍSTICAS DE VALIDAÇÃO CRUZADA DAS EQUAÇÕES SELECIONADAS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME DO FUSTE DAS PRINCIPAIS ESPÉCIES MADEIREIRAS.

Espécie	Modelo	$R^2_{aj.}$	RMSE	RMSE (%)	MAE	MAE (%)
<i>A. leiocarpa</i>	3	0,974	0,123	24,05	0,093	18,19
<i>A. graveolens</i>	4	0,987	0,079	27,37	0,060	20,88
<i>M. cinnamomifolia</i>	3	0,985	0,086	18,05	0,067	14,17
<i>P. contorta</i>	4	0,991	0,086	19,22	0,068	15,21

$R^2_{aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado, RMSE= raiz do erro quadrático médio e MAE= erro médio absoluto.

FIGURA 14 – VALIDAÇÃO DAS EQUAÇÕES SELECIONADAS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME DO FUSTE PELA DISPERSÃO ENTRE OS VALORES ESTIMADOS E OBSERVADOS. EM QUE: A (MODELO 3 AJUSTADO PARA *Apuleia leiocarpa*), B (MODELO 4 AJUSTADO PARA *Astronium graveolens*), C (MODELO 3 AJUSTADO PARA *Miconia cinnamomifolia*) E D (MODELO 4 AJUSTADO PARA *Pseudopiptadenia contorta*).



FONTE: O autor (2020).

4.1.4 Hipótese elaborada

Neste estudo, as equações genéricas apresentaram resultados semelhantes às equações para as tipologias florestais e espécies madeireiras. As estatísticas de ajuste (TABELAS 6 e 8) demonstraram que essas equações apresentaram potencial similar de predição dos volumes do fuste e total ($R^2_{aj.}$), bem como precisão semelhante (SEE). Essas estatísticas foram semelhantes mesmo com a aplicação cruzada das equações (TABELA 10). Em que a variação das estatísticas de ajuste ($R^2_{aj.}$) e precisão (RMSE%) foi insignificante.

Os testes de hipótese aplicados (χ^2 , V e H) demonstraram ausência de diferença significativa ($p\text{-valor} > 0,01$) entre os valores estimados pelas equações genéricas e específicas por tipologia e espécie (TABELA 10). Do mesmo modo, o Índice de Concordância de Willmott (dw) evidenciou elevada concordância entre os valores estimados por essas equações. Portanto,

as equações genéricas e específicas foram aderentes e geraram estimativas estatisticamente semelhantes. Assim, foi aceita a hipótese (I) que as equações genéricas proporcionam maior capacidade de generalização das estimativas, ao passo que a hipótese (II) foi rejeitada, indicando não ocorrer perda de precisão nas estimativas específicas por meio das equações genéricas.

TABELA 10 – ESTATÍSTICAS DOS TESTES DE HIPÓTESE E COMPARAÇÃO DA PRECISÃO E ACURÁCIA ENTRE AS EQUAÇÕES DE VOLUME GENÉRICAS E ESPECÍFICAS POR TIPOLOGIA FLORESTAL E ESPÉCIE.

Volume	Teste	χ^2	V	H	dw	$\Delta RMSE\%$	$\Delta R^2_{aj.}$
Fuste	GEN x FES	0,0043 ^{ns}	21945 ^{ns}	0,0085 ^{ns}	0,9999	0,401	-1,8×10 ⁻⁵
	GEN x FOD	0,0048 ^{ns}	34846 ^{ns}	0,0123 ^{ns}	0,9999	0,560	-2,1×10 ⁻⁵
	GEN x RES	0,0009 ^{ns}	5955 ^{ns}	0,0455 ^{ns}	0,9997	-1,044	-7,3×10 ⁻⁵
Total	GEN x FES	0,0111 ^{ns}	1562 ^{ns}	0,2506 ^{ns}	0,9968	-1,452	0,0003
	GEN x FOD	0,0054 ^{ns}	3168 ^{ns}	0,1687 ^{ns}	0,9978	2,443	-0,0004
	GEN x RES	0,0053 ^{ns}	661 ^{ns}	0,0598 ^{ns}	0,9953	1,786	-0,0009
Fuste	GEN x APU	0,0693 ^{ns}	1270 ^{ns}	0,0517 ^{ns}	0,9969	3,378	-0,0007
	GEN x AST	0,0028 ^{ns}	1486 ^{ns}	0,3380 ^{ns}	0,9984	2,967	-0,0005
	GEN x MIC	0,0438 ^{ns}	1193 ^{ns}	0,2289 ^{ns}	0,9946	2,878	-0,0013
	GEN x PSE	0,0087 ^{ns}	1415 ^{ns}	0,0888 ^{ns}	0,9997	2,877	-0,0007

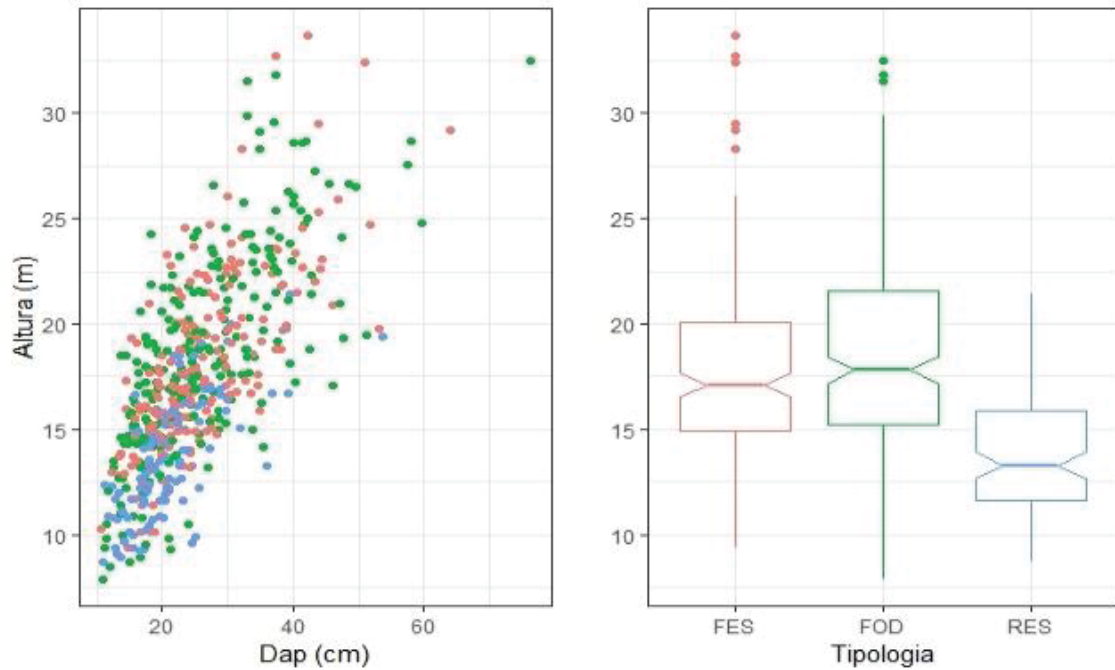
^{ns} = não significativo, χ^2 = teste do Qui-quadrado, V = teste de Wilcoxon, H = teste de Kruskal-Wallis, dw = índice de concordância de Willmott, $\Delta RMSE\%$ = variação da raiz do erro quadrático médio relativo e $\Delta R^2_{aj.}$ = variação do coeficiente de determinação ajustado.

4.2 MODELOS PARA ESTIMATIVA DA ALTURA

4.2.1 Análise exploratória dos dados

As variáveis diâmetro e altura apresentaram dispersão semelhante nas tipologias FES e FOD (FIGURA 15). Por outro lado, um padrão distinto foi constatado para a RES, que apresentou menor amplitude de variação, logo, menor variabilidade na relação altura x diâmetro. Devido à similaridade no padrão de dispersão das variáveis, a altura foi estatisticamente semelhante entre FES e FOD, com diferença observada apenas para a RES, que apresentou altura inferior as demais tipologias (FIGURA 15).

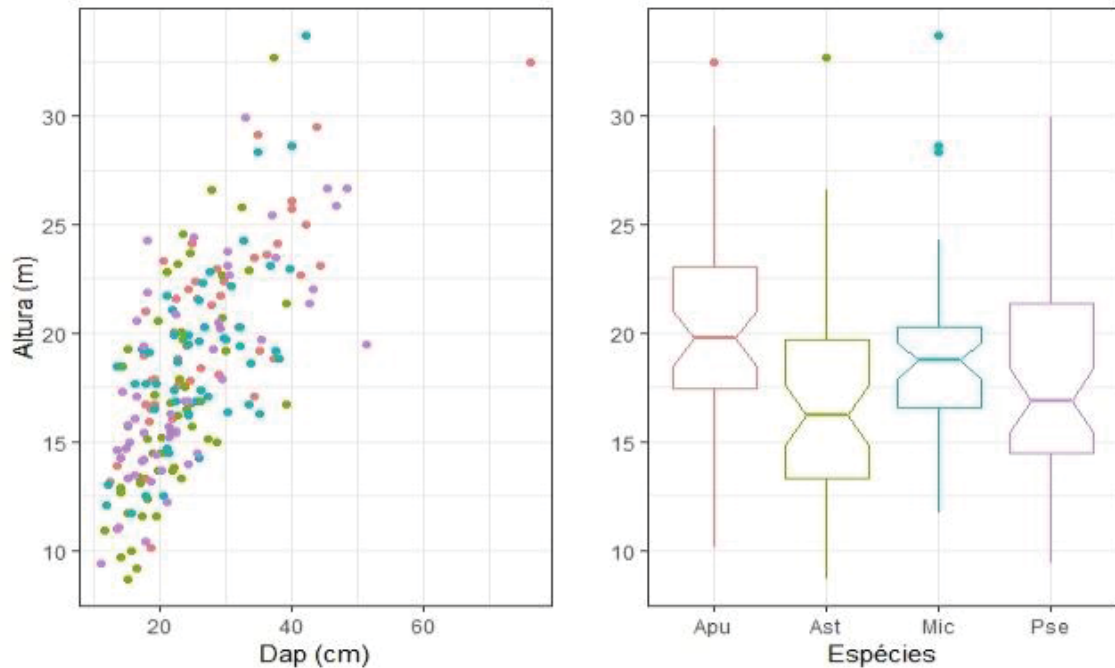
FIGURA 15 - DISPERSÃO E DISTRIBUIÇÃO DA ALTURA NAS DIFERENTES TIPOLOGIAS FLORESTAIS.



FONTE: O autor (2020).

Para as espécies madeireiras, a altura apresentou semelhança significativa entre *Apuleia leiocarpa* e *Miconia cinnamomifolia* e entre *Astronium graveolens* e *Pseudopiptadenia contorta* (FIGURA 16). No entanto, a dispersão da altura em relação ao diâmetro aparenta ser semelhante entre as espécies (FIGURA 16), com diferença observada apenas para *Astronium graveolens*, que apresentou maior variabilidade da altura em função do diâmetro.

FIGURA 16 - DISPERSÃO E DISTRIBUIÇÃO DA ALTURA DAS DIFERENTES ESPÉCIES MADEIREIRAS.



FONTE: O autor (2020).

4.2.2 Tipologias Florestais

Na Tabela 11 estão apresentados os resultados e critérios de seleção dos modelos hipsométricos ajustados por tipologia florestal. De maneira geral, os modelos 1 e 2 sem transformação das variáveis, apresentaram problemas quanto a normalidade e homocedasticidade dos resíduos. Para o modelo 1, foi constatada inflação das variâncias, o que gerou multicolinearidade. Portanto, eles foram excluídos das análises. Os modelos com transformação logarítmica das variáveis (3 e 4) atenderam aos pressupostos da regressão linear ($p\text{-valor} > 0,01$), fornecendo resíduos independentes, homocedásticos e aderentes a distribuição normal, com coeficientes significativos ($\alpha \leq 0,01$). Considerando os critérios de seleção adotados, o modelo 3 gerou o melhor ajuste (menor AIC), com estimativas precisas (menor SEE) e maior potencial de explicação da altura (maior $R^2_{aj.}$), selecionado como o mais adequado para as tipologias florestais. Devido a maior variabilidade dos dados, a equação genérica forneceu erro superior as específicas ajustadas por tipologia (0,36 – 3,03%), no entanto, permitiu maior explicação da altura (0,04 – 3,34%).

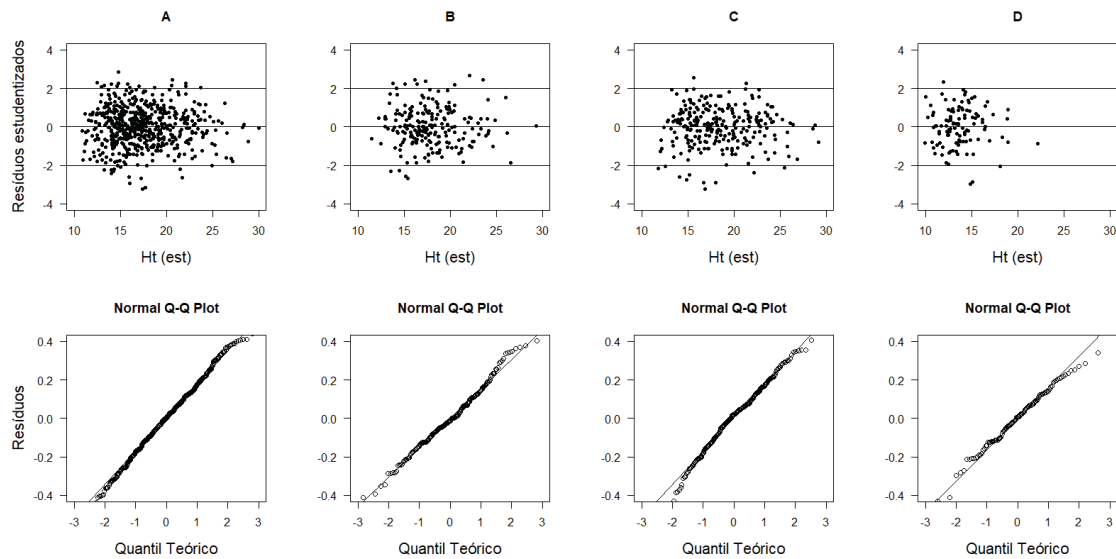
TABELA 11 - PARÂMETROS DE AJUSTE, PRECISÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS TESTADOS PARA ESTIMATIVA DA ALTURA TOTAL NAS TIPOLOGIAS FLORESTAIS.

Modelo	β_0	SE $_{\beta_0}$	β_1	SE $_{\beta_1}$	β_2	SE $_{\beta_2}$	SEE%	RMSE% ¹	MAE% ¹	R ² aj.	AIC	VIF
Genérico												
1	4,966**	0,858	0,607**	0,059	-0,004**	0,000	18,10	18,19	14,17	0,539	2937	17
2	14,257**	0,604	0,038**	0,000	-		19,06	20,14	15,50	0,489	2994	-
3	1,029**	0,071	0,567**	0,022	-		18,13	18,23	14,06	0,537	2938	-
4	3,396**	0,024	-12,831**	0,512	-		18,39	18,51	14,41	0,524	2953	-
FES												
1	6,418**	1,575	0,533**	0,108	-0,003*	0,002	16,13	16,28	12,41	0,527	1041	22
2	13,490**	0,897	0,038**	0,000	-		17,10	17,88	13,26	0,468	1064	-
3	1,184**	0,109	0,525**	0,034	-		16,09	16,23	12,18	0,529	1039	-
4	3,382**	0,037	-12,114**	0,825	-		16,54	16,69	12,67	0,502	1051	-
FOD												
1	6,069**	1,212	0,596**	0,080	-0,004**	0,001	17,74	18,02	13,96	0,535	1323	16
2	13,150**	0,931	0,037**	0,000	-		18,72	22,44	16,73	0,482	1349	-
3	1,193**	0,100	0,529**	0,031	-		17,75	17,87	13,84	0,534	1322	-
4	3,425**	0,034	-12,374**	0,721	-		17,75	17,89	14,09	0,534	1322	-
RES												
1	3,614*	1,546	0,615**	0,121	-0,006**	0,002	14,85	14,97	11,90	0,504	474	18
2	11,972**	1,153	0,053**	0,002	-		15,34	17,79	14,45	0,471	480	-
3	1,064**	0,149	0,508**	0,049	-		14,97	15,16	12,14	0,496	474	-
4	3,116**	0,054	-10,176**	1,014	-		14,99	15,18	12,09	0,495	475	-

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade, * = significativo ao nível de 5% de probabilidade, e ^{ns} = não significativo, SE= erro padrão dos coeficientes estimados, SEE= erro padrão da estimativa, RMSE= raiz do erro quadrático médio, MAE= erro médio absoluto, ¹= critérios utilizados para a validação dos modelos, R²aj.= coeficiente de determinação ajustado, AIC= critério de informação de Akaike e VIF= fator de inflação da variância.

Para reforçar a seleção das melhores equações para as tipologias, essas foram submetidas a uma análise residual gráfica (FIGURA 17). Essa análise evidenciou a ausência de viés nas estimativas, com resíduos uniformes e aderência à distribuição normal teórica. As equações foram precisas para todas as classes de altura, inclusive para as estimativas das árvores de grande porte.

FIGURA 17 - DISPERSÃO DOS RESÍDUOS DOS MODELOS DE MELHOR AJUSTE (MODELO 3) PARA ESTIMATIVA DA ALTURA TOTAL NAS TIPOLOGIAS FLORESTAIS. EM QUE: A (DADOS GENÉRICOS), B (FES), C (FOD) E D (RES).



FONTE: O autor (2020).

4.2.3 Espécies madeireiras

Para as espécies madeireiras (TABELA 12), o resultado do ajuste dos modelos foi similar ao das tipologias florestais, onde os resíduos gerados pelos modelos sem transformação das variáveis (1 e 2) não atenderam as hipóteses da regressão linear ($p\text{-valor} > 0,01$) e foram excluídos. Por meio dos critérios de seleção, o modelo 3 também foi selecionado como o mais adequado para essas espécies, com erros inferiores a 20%, exceto para *Astronium graveolens*. Para essa espécie, foi obtido o maior erro de estimativa (22,4%).

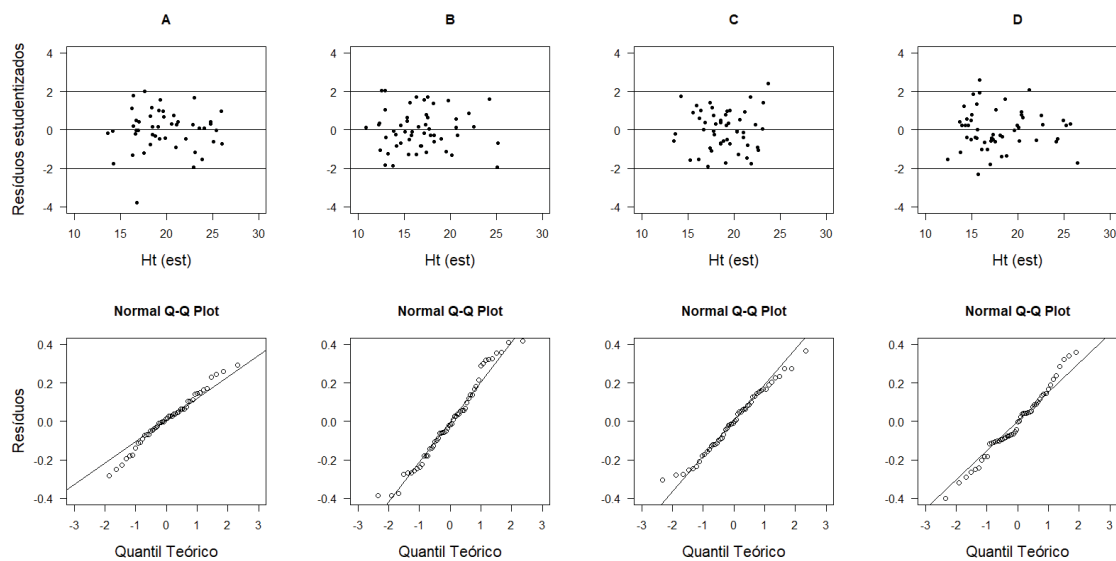
Os modelos selecionados para essas espécies apresentaram resíduos com distribuição uniforme ao longo da amplitude de valores estimados, garantindo a ausência de viés nas estimativas (FIGURA 18). Para as quatro espécies, foi observada fuga dos resíduos nos extremos caudais da distribuição, no entanto, esse comportamento não comprometeu a normalidade dos resíduos, como constatado pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (TABELA 12).

TABELA 12 – PARÂMETROS DE AJUSTE, PRECISÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS AJUSTADOS PARA ESTIMATIVA DA ALTURA TOTAL DAS ESPÉCIES MADEIREIRAS.

Modelo	β_0	SE β_0	β_1	SE β_1	β_2	SE β_2	SEE%	RMSE% ¹	MAE% ¹	R ² aj.	AIC	VIF
<i>Apuleia leiocarpa</i>												
1	7,767**	0,953	0,539**	0,058	-0,003*	0,001	14,23	17,16	12,38	0,613	242,0	12
2	14,764**	0,681	0,032**	0,001	-		16,01	26,50	17,71	0,510	252,4	-
3	1,308**	0,062	0,512**	0,025	-		14,08	14,36	11,14	0,621	240,1	-
4	3,508**	0,028	-13,003**	0,485	-		14,16	14,50	11,33	0,617	240,6	-
<i>Astronium graveolens</i>												
1	-0,358 ^{ns}	0,023	1,020**	0,056	-0,010 ^{ns}	0,001	22,44	24,11	18,84	0,421	295,8	37
2	12,347**	1,548	0,040**	0,001	-		22,86	23,98	18,08	0,399	296,8	-
3	0,653*	0,032	0,694**	0,011	-		22,37	23,14	17,94	0,425	294,5	-
4	3,478**	0,542	-14,401**	1,112	-		22,41	23,02	18,16	0,423	294,7	-
<i>Miconia cinnamomifolia</i>												
1	15,193**	1,658	-0,095 ^{ns}	0,042	0,008 ^{ns}	0,002	17,02	18,26	15,03	0,411	263,7	41
2	10,944**	0,987	0,040**	0,001	-		18,74	18,37	15,18	0,286	272,4	-
3	1,484**	0,020	0,446**	0,030	-		17,33	17,89	14,28	0,389	264,6	-
4	3,315**	0,600	-9,436**	0,850	-		17,96	18,41	14,29	0,344	268,1	-
<i>Pseudoptadenia contorta</i>												
1	4,117 ^{ns}	1,101	0,781**	0,044	-0,008*	0,001	18,21	18,94	15,41	0,512	281,3	33
2	10,141**	0,755	0,041**	0,003	-		18,83	22,71	16,16	0,478	283,9	-
3	1,307**	0,022	0,496**	0,001	-		18,30	18,71	14,64	0,507	280,9	-
4	3,393**	0,564	-11,444**	0,098	-		18,33	18,65	15,27	0,505	281,1	-

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade, * = significativo ao nível de 5% de probabilidade, e ^{ns} = não significativo, SE= erro padrão dos coeficientes estimados, SEE= erro padrão da estimativa, RMSE= raiz do erro quadrático médio, MAE= erro médio absoluto, ¹= critérios utilizados para a validação dos modelos, R²aj.= coeficiente de determinação ajustado, AIC= critério de informação de Akaike e VIF= fator de inflação da variância.

FIGURA 18 - DISPERSÃO DOS RESÍDUOS GERADOS PELOS MODELOS DE MELHOR AJUSTE PARA ESTIMATIVA DA ALTURA TOTAL DAS ESPÉCIES MADEIREIRAS. EM QUE: MODELO 3 PARA A (*Apuleia leiocarpa*), B (*Astronium graveolens*) E C (*Miconia cinnamomifolia*) E MODELO 4 PARA D (*Pseudoptadenia contorta*).

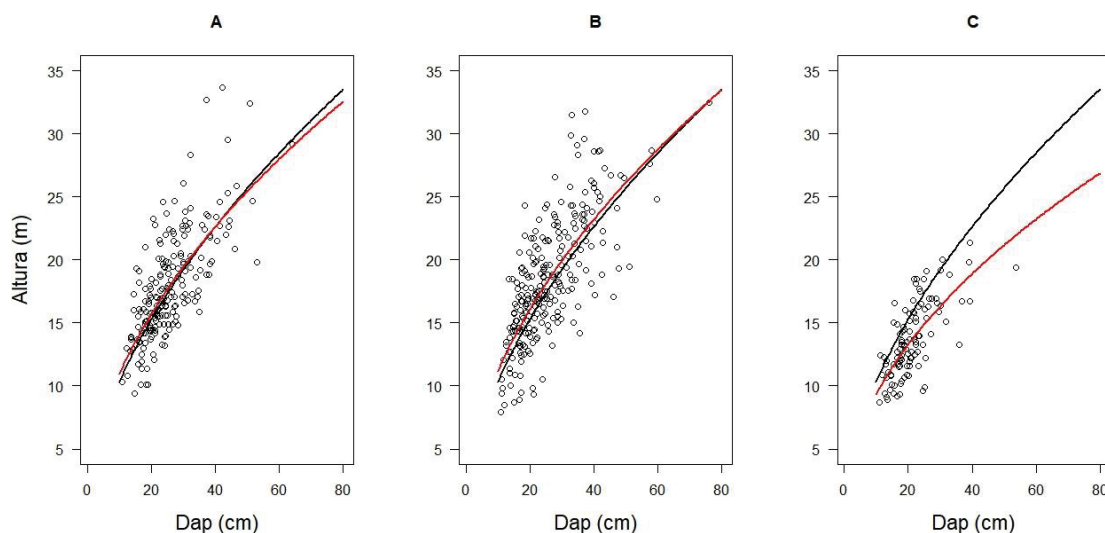


FONTE: O autor (2020).

4.2.4 Hipótese elaborada

A equação genérica apresentou desempenho similar as específicas para FES e FOD (FIGURA 19A - B). Diferença foi observada em relação às estimativas geradas pela equação da RES (FIGURA 19C), com evidente tendência de superestimativa da equação genérica. No mesmo sentido, o resultado dos testes de aderência (TABELA 13) indicam que as estimativas geradas pela equação genérica não apresentam diferenças significativas ($\alpha \leq 0,01$) às geradas pelas equações da FES e FOD, com diferença significativa para RES. Em detrimento a equação genérica, o uso da específica para RES aumenta em até 6% a precisão das estimativas, corrigindo a tendência de superestimativa observada (FIGURA 19C). Assim, a hipótese elaborada (I) foi parcialmente aceita, indicando que o uso da equação genérica foi comprometido apenas para RES. Apenas o teste do Qui-quadrado indicou a ausência de diferença significativa da equação genérica com RES. Em comparação à equação para FES, a equação genérica apresenta uma sutil subestimativa das árvores de até 40 cm de diâmetro, a partir do qual, tende a superestimar as alturas (FIGURA 19A). Em relação à equação para FOD, ela apresenta uma leve subestimativa até 60 cm de diâmetro, igualando as previsões para as árvores de grande porte (FIGURA 19B).

FIGURA 19 – COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DA EQUAÇÃO GENÉRICA (CURVA PRETA) E EQUAÇÕES ESPECÍFICAS AJUSTADAS (MODELO 3) PARA AS TIPOLOGIAS FLORESTAIS (CURVA VERMELHA). EM QUE: A (FES), B (FOD) E C (RES).



FONTE: O autor (2020).

TABELA 13 – ESTATÍSTICAS DOS TESTES DE HIPÓTESE E COMPARAÇÃO DA PRECISÃO E ACURÁCIA ENTRE AS EQUAÇÕES DE HIPSOMÉTRICAS GENÉRICAS E ESPECÍFICAS POR TIPOLOGIA FLORESTAL E ESPÉCIE.

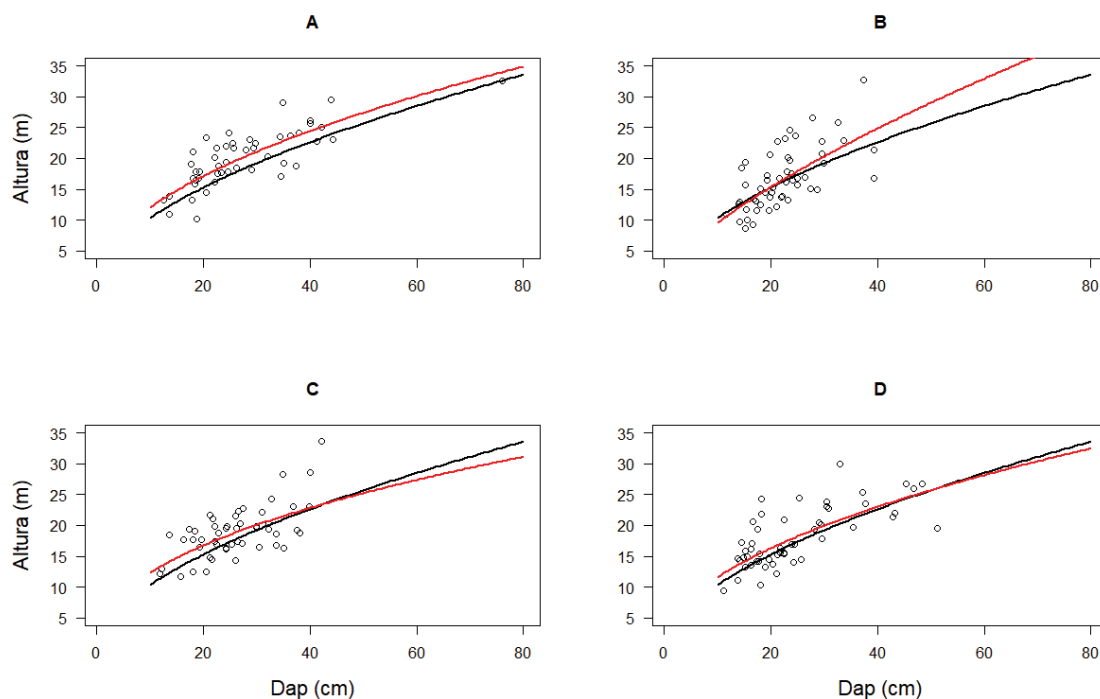
Dados	Teste	χ^2	V	H	Δ RMSE%	Δ R ² aj.
Tipologias	GEN x FES	0,3384 ^{ns}	20193 ^{ns}	1,8394 ^{ns}	0,268	-1,5E-04
	GEN x FOD	0,4519 ^{ns}	28101 ^{ns}	8,3371 ^{ns}	0,816	-3,5E-04
	GEN x RES	0,2453 ^{ns}	9015 ^{**}	42,264 ^{**}	6,251	-9,5E-03
Espécies	GEN x APU	0,1897 ^{ns}	816 ^{ns}	8,4836 ^{ns}	3,304	-8,9E-03
	GEN x AST	0,1074 ^{ns}	856 ^{**}	10,933 ^{**}	-0,647	1,4E-03
	GEN x MIC	0,1188 ^{ns}	828 ^{ns}	8,2601 ^{ns}	1,208	-3,8E-03
	GEN x PSE	0,2132 ^{ns}	771 ^{ns}	7,2232 ^{ns}	0,723	-1,6E-03

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade, * = significativo ao nível de 5% de probabilidade, ^{ns} = não significativo, χ^2 = teste do Qui-quadrado, V = teste de Wilcoxon, H = teste de Kruskal-Wallis, Δ RMSE%= variação da raiz do erro quadrático médio relativo e Δ R²aj.= variação do coeficiente de determinação ajustado.

A equação genérica apresentou desempenho semelhante as específicas para *Apuleia leiocarpa*, *Miconia cinnamomifolia* e *Pseudopiptadenia contorta* (FIGURA 20A, C e D). Em comparação a equação para *Apuleia leiocarpa*, houve uma suave tendência de subestimativa da equação genérica. No entanto, para essa espécie, a equação genérica apresentou melhor previsão para a altura da árvore de maior porte ($d = 76.1$ cm). Em comparação com *Astronium graveolens* (FIGURA 20B), as equações foram semelhantes apenas para árvores de pequeno e médio porte ($d < 25$ cm), ao passo que para as maiores árvores a discrepância entre essas equações foi nítida. A diferença observada para *Astronium graveolens* foi comprovada pelos testes de aderência, assim como a semelhança para as estimativas específicas para as demais espécies (TABELA 13).

Considerando o efeito aditivo da variável categórica “tipologia florestal”, a hipótese nula foi rejeitada ($\alpha \leq 0,01$), evidenciando o efeito significativo das tipologias florestais sobre a altura das árvores (TABELA 14). Esse efeito foi mais expressivo para FOD e FES e menor para RES. Por consequência, para um mesmo diâmetro, a altura das árvores foi suavemente maior em FOD em relação a FES (FIGURA 21). Assim, a inclusão das tipologias alterou os interceptos em relação a equação genérica. Por outro lado, a interação entre as variáveis $\ln(dap)$ e a tipologia florestal foi não significativa ($\alpha \leq 0,01$), indicando que o efeito estimado para essa interação foi nulo.

FIGURA 20 - COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DA EQUAÇÃO GENÉRICA (CURVA PRETA) E EQUAÇÕES ESPECÍFICAS AJUSTADAS (MODELO 3) PARA AS ESPÉCIES MADEIREIRAS (CURVA VERMELHA). EM QUE: A (*Apuleia leiocarpa*), B (*Astronium graveolens*), C (*Miconia cinnamomifolia*) E D (*Pseudopiptadenia contorta*).



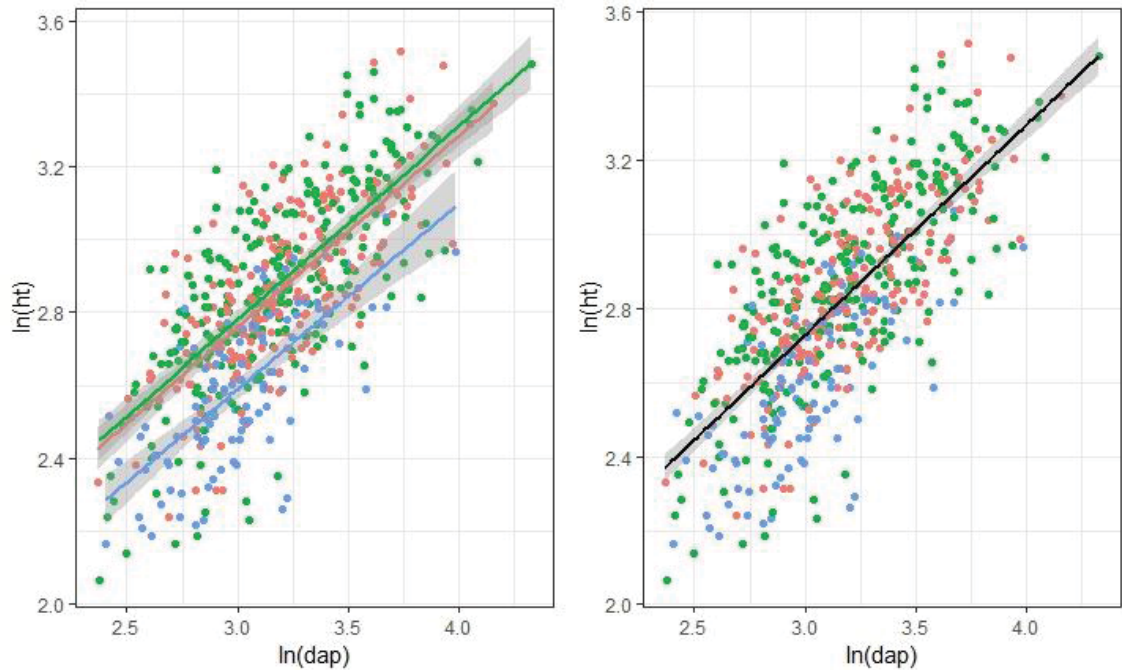
FONTE: O autor (2020).

TABELA 14 - PARÂMETROS DE AJUSTE DOS MODELOS CONSTRUÍDOS PARA TESTAR O EFEITO DAS TIPOLOGIAS FLORESTAIS SOBRE A RELAÇÃO $h \times d$.

Efeitos	Variável	β_i	SEE	t	p-valor
Aditivos: $\log(ht) \sim 0 + \log(dap) + \text{tipologias}$	$\ln(dap)$	0,525	0,021	25,25	**
	FOD	1,207	0,067	17,98	**
	RES	1,014	0,065	15,69	**
	FES	1,184	0,067	17,6	**
Interação: $\log(ht) \sim 0 + \log(dap) * \text{tipologias}$	$\ln(dap)$	0,525	0,037	14,35	**
	FOD	1,193	0,091	13,04	**
	RES	1,063	0,167	6,36	**
	FES	1,184	0,117	10,1	**
	$\ln(dap):FOD$	0,004	0,046	0,09	ns
	$\ln(dap):RES$	0,016	0,066	0,24	ns
	$\ln(dap):FES$	0,006	0,057	0,12	ns

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade, ^{ns} = não significativo, SEE= erro padrão da estimativa, t = estatística t, p-valor= valor p associado.

FIGURA 21 – EFEITO DAS TIPOLOGIAS FLORESTAIS SOBRE A RELAÇÃO ALTURA X DIÂMETRO. EM QUE: FES (VERDE), FOD (VERMELHO), RES (AZUL) E EQUAÇÃO GENÉRICA (CURVA PRETA).



FONTE: O autor (2020).

No MLEM 1, os efeitos aleatórios apresentaram variância superior à variância do erro ($\tau_{00} > \sigma^2$), indicando que há maior variabilidade proveniente das tipologias florestais (TABELA 15). Esse modelo apresentou a maior diferença entre os coeficientes de determinação condicional (R^2c) e marginal (R^2m), caracterizando maior influência dos efeitos aleatórios nos componentes de variância. Para o MLEM 2, a variância dos efeitos aleatórios reduziu consideravelmente (τ_{00}), revelando uma menor assimilação da variabilidade proveniente das espécies em relação às tipologias (MLEM 1). Esse resultado sugere que há maior variabilidade entre as três tipologias florestais, quando comparado com as 84 espécies. Esse modelo reduziu a diferença entre os R^2 condicional e marginal, ocasionando menor influência dos efeitos aleatórios nos componentes de variância.

Devido ao efeito significativo sobre a altura das árvores (TABELAS 14 e 15), as tipologias foram usadas como parâmetros de efeitos fixos e as espécies como efeitos aleatórios para construção do MLEM 3. Esse modelo apresentou o melhor ajuste (AIC) e a menor variância (σ^2 e τ_{00}) dentre os MLEM testados. Por meio desse modelo, 64% da altura das árvores foi explicada pelos efeitos fixos (*dap* e tipologias) e aleatório (espécies e erros aleatórios). Esse modelo reduziu consideravelmente a diferença entre os R^2 condicional e marginal (5%), indicando a menor variação causada por efeitos aleatórios. Portanto, o MLEM3 foi considerado o mais eficiente, apresentando a estrutura de modelo global mais parcimoniosa para a escala regional analisada.

TABELA 15 - RESULTADOS DOS MODELOS LINEARES DE EFEITO MISTO AJUSTADOS PARA ANÁLISE DOS EFEITOS DAS TIPOLOGIAS FLORESTAIS E ESPÉCIES DO BIOMA MATA ATLÂNTICA NA ALTURA TOTAL DAS ÁRVORES; Σ^2 : VARIÂNCIA RESIDUAL; T_{00} : VARIÂNCIA ALEATÓRIA DO INTERCEPTO.

Efeitos fixos	MLEM 1			MLEM 2			MLEM 3		
	β_i	SE	P (> t)	β_i	SE	P (> t)	β_i	SE	P (> t)
$\ln(dap)$	0,53	0,02	<0,001	0,87	0,001	<0,001	0,51	0,02	<0,001
DOF							1,23	0,07	<0,001
RES							1,04	0,06	<0,001
SSF							1,20	0,07	<0,001
Efeitos aleatórios	Tipologias (3)		Espécies (84)		Espécies (84)				
σ^2	0,0279		0,0397		0,0248				
τ_{00}	1,2749		0,0059		0,0035				
n	572		572		572				
R^2m	0,457		0,503		0,589				
R^2c	0,608		0,606		0,639				
AIC	2903,4		3138,8		2867,1				

SE= erro padrão dos coeficientes, P= p-valor associado à estatística t da regressão, σ^2 = variância total, τ_{00} = variância dos efeitos aleatórios, n= número de observações, R^2m = coeficiente de determinação marginal (efeitos fixos), R^2c = coeficiente de determinação condicional (efeitos fixos e aleatórios), AIC= critério de informação de Akaike.

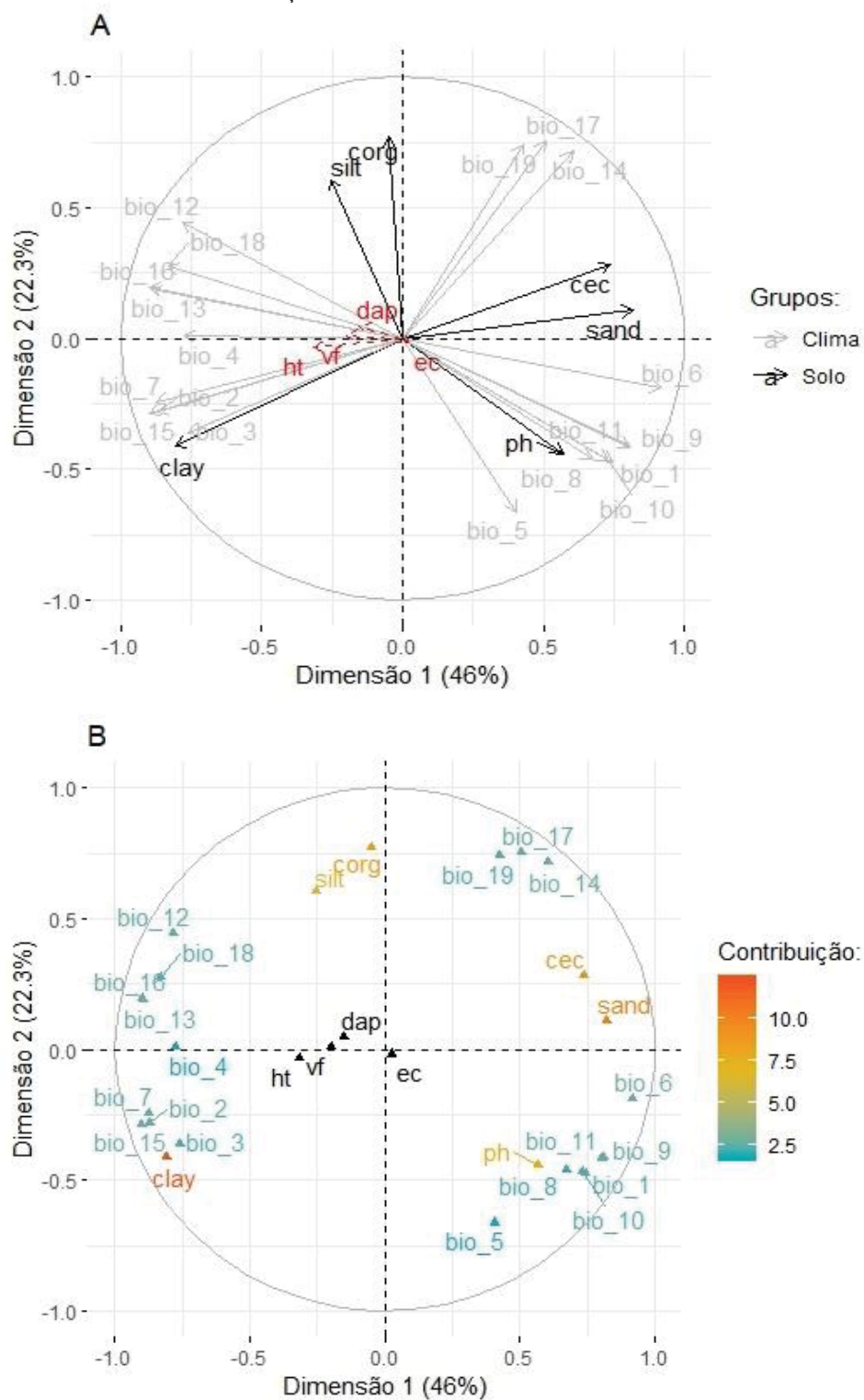
4.3 EFEITO DO AMBIENTE NAS RELAÇÕES ALOMÉTRICAS

4.3.1. Modelos alométricos geoclimáticos

A ordenação das variáveis recuperou dois gradientes de variação ambiental, que explicaram 68% da variância na base de dados (FIGURA 22A). As variáveis edáficas foram as mais importantes para a explicação da variabilidade ambiental (FIGURA 22B). No mesmo sentido, apresentaram maior contribuição para a definição das primeiras dimensões do ordenamento (APÊNDICE 5). Com destaque para as Frações de Areia e Argila, Capacidade de Troca Catiônica e pH do solo. A primeira dimensão também apresentou forte carga de variáveis climáticas relacionadas à precipitação e altamente correlacionadas (setas no mesmo sentido). Assim, a primeira dimensão representou um gradiente de aumento da precipitação. Na segunda dimensão, as variáveis climáticas relacionadas à temperatura apresentaram maior carga. Por sua vez, representou um gradiente de aumento da temperatura.

As três variáveis alométricas de resposta (ec, ht e vf), usadas como variáveis de suporte na MFA, mostraram-se correlacionadas positivamente com as covariáveis relacionadas à temperatura (FIGURA 22). A espessura da casca também apresentou forte correlação positiva com o pH dos solos, enquanto o diâmetro se correlacionou positivamente com características da precipitação.

FIGURA 22 – ORDENAÇÃO DAS VARIÁVEIS ALOMÉTRICAS E COVARIÁVEIS AMBIENTAIS POR MEIO DA ANÁLISE DE MÚLTIPLOS FATORES, NA QUAL AS VARIÁVEIS DE RESPOSTA FORAM USADAS DE FORMA ILUSTRATIVA AO LONGO DAS DIMENSÕES (DAP, EC, HT E VF). EM QUE: A, REPRESENTA O CÍRCULO DE CORRELAÇÃO ENTRE OS GRUPOS DE VARIÁVEIS E B, REPRESENTA A CONTRIBUIÇÃO RELATIVA DE CADA COVARIÁVEL AMBIENTAL.



FONTE: O autor (2020).

As covariáveis Teor de Argila e Temperatura Média Anual apresentaram inflação das variâncias nos modelos empíricos (TABELA 16), como consequência da alta correlação com o Teor de Areia e Sazonalidade da Temperatura, respectivamente. Devido ao processo de seleção de variáveis adotado e ao menor potencial de explicação para as variáveis alométricas de resposta, essas covariáveis foram excluídas de todos os modelos geoclimáticos ajustados. Os modelos finais foram compostos por covariáveis significativas ($\alpha = 0,05$) e não colineares (TABELA 16) para todas as variáveis de resposta.

O processo de seleção de variáveis ocasionou uma evolução dos modelos geoclimáticos, com melhoras evidentes do modelo final em relação aos modelos empíricos e cheios. Em todos os casos, a perda de informação foi menor para os modelos finais (AIC e BIC). Quanto à explicação das variáveis de resposta (pseudo R^2 e L), houve piora em relação aos modelos empíricos. No entanto, essa diferença foi quase imperceptível, com mudanças dos coeficientes apenas após a segunda casa decimal para o pseudo R^2 e de no máximo cinco unidades para máxima verossimilhança (L). Cabe ressaltar que os modelos empíricos são multicolineares, gerando uma interpretação não confiável para os valores de pseudo R^2 e L.

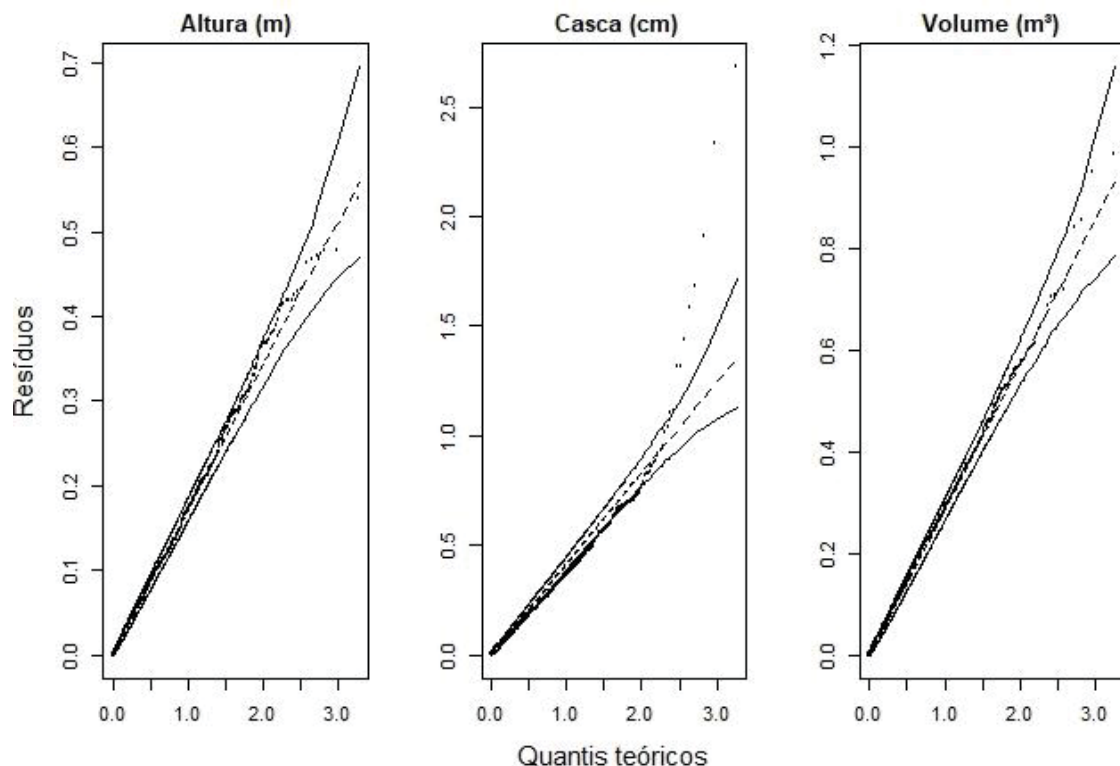
TABELA 16 - PARÂMETROS DE AJUSTE E PRECISÃO DOS MODELOS GENERALIZADOS GEOCLIMÁTICOS AJUSTADOS PARA SELEÇÃO DAS COVARIÁVEIS AMBIENTAIS.

Modelo	Estrutura	pseudo R^2	AIC	BIC	L
Altura Total					
Empírico	$h \sim \beta 0^{**} + \text{dap}^{**} + \text{cec}^{**} + \text{clay} + \text{sand} + \text{ph} + \text{bio_1}^{**} + \text{bio_4}^{**} + \text{bio_12}^{**} + \text{bio_15}$	0,583	2850	2898	-1414
Cheio	$h \sim \beta 0^{**} + \text{dap}^{**} + \text{cec}^{**} + \text{sand}^{**} + \text{ph} + \text{bio_4}^{*} + \text{bio_12} + \text{bio_15}$	0,577	2854	2893	-1418
Final	$ht \sim \beta 0^{**} + \text{dap}^{**} + \text{cec}^{**} + \text{sand}^{**}$	0,575	2851	2877	-1419
Espessura da Casca					
Empírico	$ec \sim \beta 0 + \text{dap}^{**} + \text{cec} + \text{clay} + \text{sand}^{*} + \text{ph}^{**} + \text{bio_1} + \text{bio_4} + \text{bio_12} + \text{bio_15}$	0,179	126	174	-52
Cheio	$ec \sim \beta 0^{**} + \text{dap}^{**} + \text{cec} + \text{sand} + \text{ph}^{**} + \text{bio_4} + \text{bio_12}^{*} + \text{bio_15}$	0,173	127	166	-55
Final	$ec \sim \beta 0^{**} + \text{dap}^{**} + \text{ph}^{**} + \text{bio_12}^{**}$	0,171	121	143	-55
Volume do Fuste					
Empírico	$v \sim \beta 0^{**} + \text{dap}^{**} + \text{cec}^{*} + \text{clay} + \text{sand} + \text{ph} + \text{bio_1} + \text{bio_4}^{**} + \text{bio_12} + \text{bio_15}^{*}$	0,875	-1178	-1130	600
Cheio	$v \sim \beta 0^{**} + \text{dap}^{**} + \text{cec}^{**} + \text{sand}^{**} + \text{ph} + \text{bio_4}^{**} + \text{bio_12} + \text{bio_15}^{**}$	0,875	-1178	-1139	598
Final	$v \sim \beta 0^{**} + \text{dap}^{**} + \text{cec}^{**} + \text{sand}^{**} + \text{bio_4}^{**} + \text{bio_15}^{**}$	0,875	-1182	-1152	598

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade e * = significativo ao nível de 5% de probabilidade. Em que: covariáveis destacadas em negrito apresentam VIF > 10 e covariáveis sem indicação de significância foram não-significativas. Pseudo R^2 = variância explicada pelo modelo generalizado, AIC = critério de informação de Akaike, BIC = critério de informação Bayesiano, L = valor de verossimilhança.

Os modelos geoclimáticos finais apresentaram resíduos aleatoriamente dispersos dentro dos envelopes simulados para as variáveis altura e volume (FIGURA 23), de acordo com o esperado para um bom modelo ajustado. Para a espessura de casca, os resíduos possuem tendência evidente, onde a maioria dos pontos apresentou distribuição marginal e não aderente ao intervalo dos envelopes simulados.

FIGURA 23 - ENVELOPES SIMULADAS PARA OS RESÍDUOS GERADOS PELOS MODELOS GENERALIZADOS FINAIS.



FONTE: O autor (2020).

Em relação aos modelos alométricos simples, com base apenas no diâmetro como variável preditora, os ganhos em eficiência e informação foram expressivos para os modelos geoclimáticos (TABELA 17). Os modelos alométricos simples geraram maior perda de informação e menor eficiência, enquanto os modelos geoclimáticos forneceram maior explicação das variáveis alométricas de resposta, com valores mais próximos dos reais (maior L).

Em termos de explicação da variável resposta e eficiência (pseudo R^2), o efeito da inserção das covariáveis ambientais foi mais expressivo para altura e espessura da casca das árvores. O efeito dessas covariáveis foi mínimo para a explicação da variabilidade do volume das árvores. A análise de variância aplicada para comparar os modelos alométricos simples e geoclimáticos indicou que esses modelos diferem quanto às estimativas geradas ($\alpha = 0,01$). Portanto, os modelos geoclimáticos ocasionam melhorias significativas quanto ao potencial preditivo das variáveis alométricas.

TABELA 17 – COMPARAÇÃO DOS MODELOS GENERALIZADOS ALOMÉTRICOS E GEOCLIMÁTICOS PARA AS TRÊS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS DE RESPOSTA.

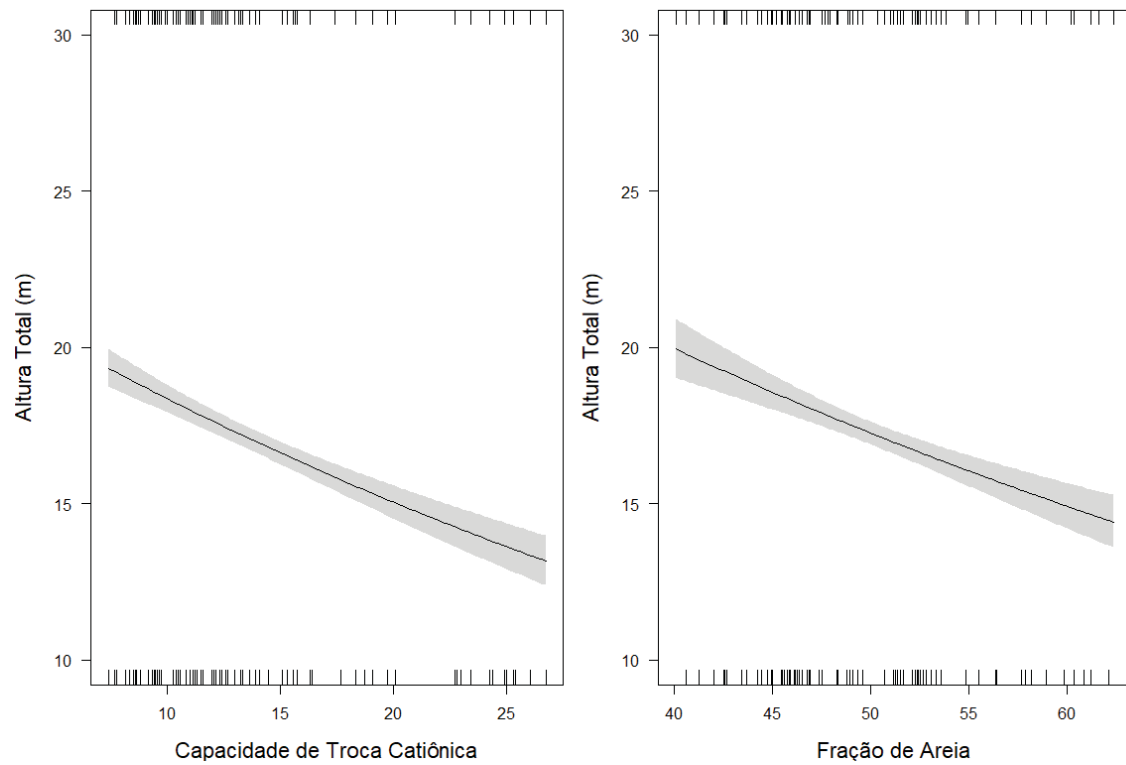
Modelo	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	Pseudo R ²	AIC	BIC	L	Anova
Altura Total											
alométrico	2,328** (0,02)	0,020** (0,00)	-	-	-	-	0,499	2943	2956	-	**
geoclimático	2,831** (0,08)	0,019** (0,00)	-0,011** (0,00)	-0,007** (0,00)	-	-	0,575	2851	2877	-	
Espessura da Casca											
alométrico	-0,805** (0,05)	0,018** (0,00)	-	-	-	-	0,146	137	150	-65	**
geoclimático	1,894** (0,07)	0,019** (0,00)	-0,041** (0,01)	-0,0004** (0,00)	-	-	0,171	121	143	-55	
Volume do Fuste											
alométrico	-3,255** (0,03)	0,083** (0,00)	-	-	-	-	0,871	-	-	561	**
geoclimático	-1,971** (0,31)	0,081** (0,00)	-0,009** (0,00)	-0,011** (0,00)	-0,0004** (0,00)	0,007** (0,00)	0,875	-	-	598	

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade, Pseudo R²= variância explicada pelo modelo generalizado, AIC= critério de informação de Akaike, BIC= critério de informação Bayesiano, L= valor de verossimilhança. Entre parênteses são apresentados os erros padrão de cada coeficiente estimado.

Nos modelos geoclimáticos, foi constatada ampla variação para a magnitude dos coeficientes alométricos (TABELA 17), de acordo com cada covariável preditiva. Para as três variáveis de resposta, o coeficiente alométrico do diâmetro (β_1) apresentou sinal positivo, indicando relação diretamente proporcional entre as variáveis alométricas. Para a altura total das árvores, foi verificado o efeito negativo da Capacidade de Troca Catiônica (β_2) e da Fração de Areia (β_3), com relação biológica inversamente proporcional. Na espessura da casca das árvores, foi verificado o efeito negativo do pH do solo (β_2) e da Precipitação (β_3). Para o volume do fuste das árvores, as covariáveis Capacidade de Troca Catiônica (β_2) e Fração de Areia (β_3) também exerceram efeitos negativos. Efeito positivo foi constatado apenas para a Sazonalidade da Precipitação (β_5).

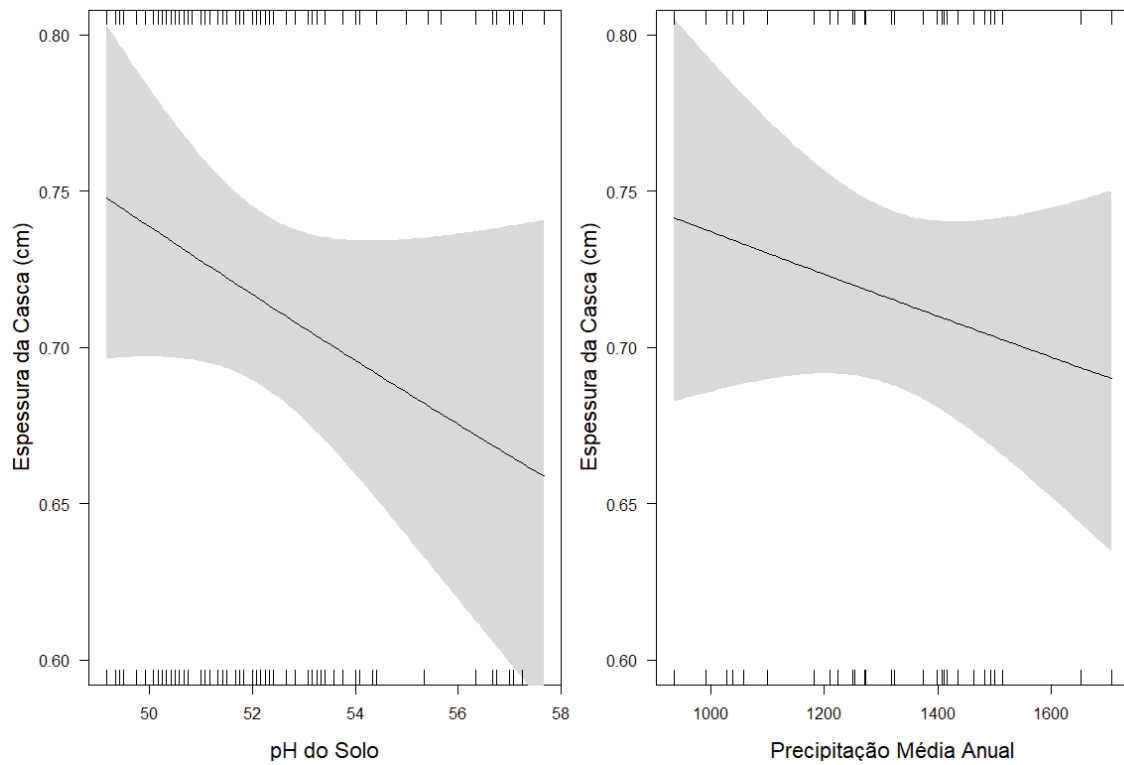
Os efeitos independentes das covariáveis ambientais selecionadas nas variáveis alométricas são detalhados nas Figuras 24 a 26. Os resultados são equivalentes aos coeficientes dos modelos geoclimáticos (TABELA 17). Com exceção a Sazonalidade da Temperatura, que, quando analisada separadamente, apresentou efeito positivo no volume do fuste (FIGURA 26). Os intervalos de confiança gerados para a relação preditiva das covariáveis com a espessura da casca apresentaram grande variação (FIGURA 25). Essa variação decorreu da dificuldade em modelar essa característica das árvores e demonstrada pela falta de aderência dos resíduos aos envelopes simulados (FIGURA 23), bem como pela inferioridade das estatísticas de ajuste em relação as demais variáveis alométricas (TABELA 17).

FIGURA 24 – ALTURA MÉDIA DAS ÁRVORES EM FUNÇÃO DAS COVARIÁVEIS SELECIONADAS PARA O MODELO GEOCLIMÁTICO. EM QUE: AS ÁREAS CINZAS, DELIMITAM OS INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95% E LINHAS PRETAS, CORRESPONDEM A ESTIMATIVA MÉDIA GERADA POR MEIO DO GLM.



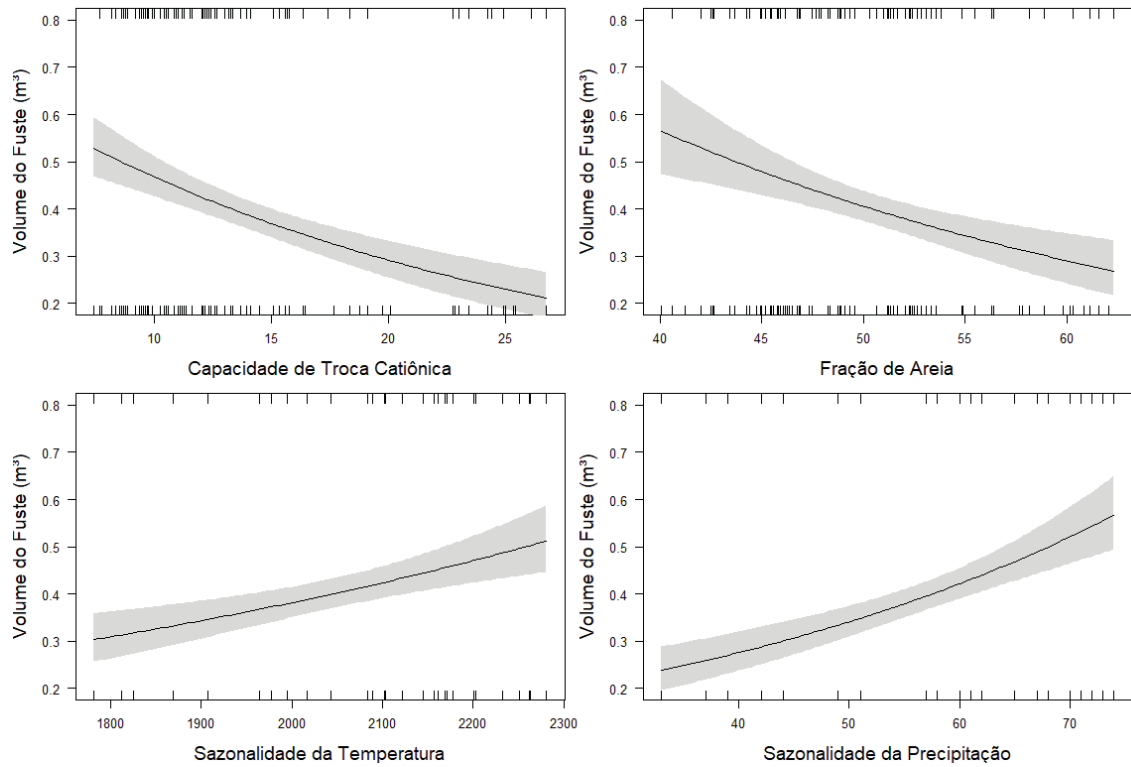
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 25 – ESPESSURA MÉDIA DA CASCA DAS ÁRVORES EM FUNÇÃO DAS COVARIÁVEIS SELECIONADAS PARA O MODELO GEOCLIMÁTICO. EM QUE: AS ÁREAS CINZAS, DELIMITAM OS INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95% E LINHAS PRETAS, CORRESPONDEM A ESTIMATIVA MÉDIA GERADA POR MEIO DO GLM.



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 26 – VOLUME MÉDIO DO FUSTE DAS ÁRVORES EM FUNÇÃO DAS COVARIÁVEIS SELECIONADAS PARA O MODELO GEOCLIMÁTICO. EM QUE: AS ÁREAS CINZAS, DELIMITAM OS INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95% E LINHAS PRETAS, CORRESPONDEM A ESTIMATIVA MÉDIA GERADA POR MEIO DO GLM.



FONTE: O autor (2020).

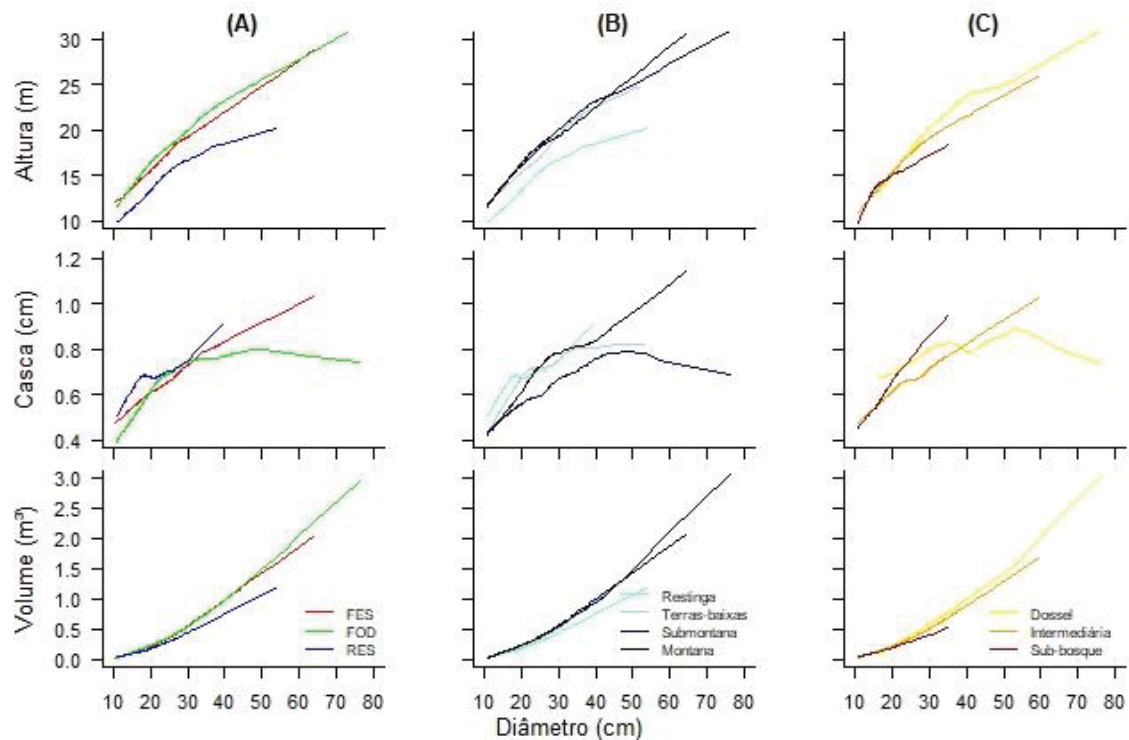
4.3.2. Efeito dos ambientes na alometria das árvores

A análise gráfica das relações alométricas evidenciou padrões distintos para os diferentes ambientes (FIGURA 27). Quanto ao efeito das tipologias florestais, a altura e o volume das árvores tenderam a serem maiores na FOD e FES (FIGURA 27A). Padrão contrário foi encontrado para a espessura da casca das árvores, que tende a ser maior na RES. Por tipo de vegetação, padrões distintos também foram evidenciados para as relações alométricas (FIGURA 27B). Na área de estudo, a altura e o volume das árvores tenderam a aumentar com a elevação até uma determinada altitude. No entanto, a semelhança entre as alometrias das regiões Submontanas e Montanas indica a estabilização nessa taxa de aumento em altitudes superiores a 600 m.s.n.m.

A espessura da casca mostrou-se ser maior nos extremos altitudinais, em que as restingas representam as cotas inferiores, enquanto as regiões Montanas indicam as cotas superiores. Quanto a posição vertical das árvores no interior das florestas (FIGURA 27C), a altura e o volume das árvores tenderam a aumentar na direção do dossel em plena iluminação. Curvas mais suaves e com menor inclinação foram observadas para as árvores do estrato

inferior (sub-bosque). Para as árvores de dossel, foi possível observar que a espessura da casca tendeu a estabilizar nas maiores árvores ($dap > 45\text{cm}$), enquanto a das árvores intermediárias e de sub-bosque apresentaram contínuo crescimento com o aumento do tamanho da árvore (dap).

FIGURA 27 - VARIAÇÃO DAS RELAÇÕES ALOMÉTRICAS NOS DIFERENTES AMBIENTES CONTIDOS NA ÁREA DE ESTUDO. EM QUE: COLUNA A (TIPOLOGIAS FLORESTAIS), COLUNA B (TIPOS DE VEGETAÇÃO) E COLUNA C (POSIÇÃO SOCIOLÓGICA DAS ÁRVORES).



FONTE: O autor (2020).

Considerando o efeito das tipologias florestais, tipos de vegetação e posição sociológica das árvores como fatores na relação alométrica entre as variáveis (TABELA 18), todos os interceptos (β_0) foram significativos e estatisticamente diferentes de zero ($\alpha = 0,01$). Em relação às três variáveis alométricas analisadas, a interação do diâmetro foi significativa ($\alpha = 0,01$) com os diferentes ambientes. Esse resultado sugere que os fatores alteraram os interceptos dos modelos e as inclinações para as relações alométricas puras ($ht, ec, vf \sim dap$). Portanto, o efeito dos ambientes nas relações alométricas analisadas foi confirmado.

A análise dos coeficientes alométricos dos modelos categóricos (TABELA 18) reforça o resultado das análises gráficas (FIGURA 27). Nas tipologias florestais, o coeficiente alométrico para a altura foi maior na FOD, enquanto o coeficiente do volume foi maior na FES e o da espessura da casca maior na RES. Nos tipos de vegetação, os coeficientes alométricos da altura e do volume tenderam a aumentar com o aumento das cotas altitudinais. Nesse sentido,

a estabilização da altura em uma altitude máxima (600 m.s.n.m.) foi confirmada pela igualdade dos coeficientes para as florestas Submontanas e Montanas. Para a espessura de casca, os maiores coeficientes alométricos na restinga e florestas Montanas confirmaram a tendência de cascas mais espessas nos extremos altitudinais. Considerando a posição sociológica, as árvores de dossel apresentaram maior coeficiente alométrico para a altura, as intermediárias, maior coeficiente para o volume e as de sub-bosque, maior coeficiente para a espessura da casca.

TABELA 18 – MODELOS GENERALIZADOS CATEGÓRICOS AJUSTADOS PARA DESCRIÇÃO DAS RELAÇÕES ALOMÉTRICAS POR AMBIENTE, CONSIDERANDO AS TIPOLOGIAS FLORESTAIS, TIPOS DE VEGETAÇÃO E POSIÇÃO SOCIOLÓGICA COMO FATORES.

EQUAÇÃO DE REGRESSÃO E POSIÇÃO SOCIOLOGICA COMO FATORES.												
Coefficientes	Altura	Pse. R²	AIC	L	Casca	Pse. R²	AIC	L	Volume	Pse. R²	AIC	L
Tipologia Florestal												
β₀	2,3718**				-0,8309**				-3,2101**			
FES	0,0194**	0,565	2867	-1428	0,0196**	0,157	134	-62	0,0834**	0,880	-1152	581
FOD	0,0199**				0,0176**				0,0813**			
RES	0,0121**				0,0228**				0,0735**			
Tipo de Vegetação												
β₀	2,3685**				-0,8315**				-3,2198**			
terras-baixas	0,0189**	0,567	2866	-1427	0,0196**	0,170	127	-57	0,0799**	0,882	-1160	586
montana	0,0202**				0,0204**				0,0847**			
restinga	0,0122**				0,0228**				0,0739**			
sub-montana	0,0202**				0,0153**				0,0824**			
Posição Sociológica												
β₀	2,3647**				-0,8373**				-3,1881**			
dossel	0,0197**	0,505	2940	-1465	0,0187**	0,148	140	-65	0,0803**	0,877	-1141	575
intermediária	0,0190**				0,0193**				0,0816**			
sub-bosque	0,0165**				0,0217**				0,0719**			

** = significativo ao nível de 1%, Pseudo R²= variância explicada pelo modelo generalizado, AIC= critério de informação de Akaike, L= valor de verossimilhança.

Nesse sentido, os ambientes analisados apresentam efeito variado sobre as relações alométricas. De acordo com os critérios estatísticos de qualidade e consistência, o efeito do fator “tipo de vegetação” permitiu maior explicação e menor perda de informação para as variáveis alométricas (TABELA 18). Para as três variáveis alométricas, os modelos categóricos foram superiores aos modelos alométricos simples (TABELA 17), incorporando ganhos expressivos em precisão e eficiência.

5. DISCUSSÃO

5.1 MODELOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME

5.1.1 Análise exploratória dos dados

A gama de condições ambientais presente no estado do Rio de Janeiro (SCARANO, 2002) proporciona a formação de diversos tipos de vegetação (COELHO et al., 2017), cada um caracterizado por uma flora típica (NETTESHEIM et al., 2010). Essas condições ambientais também são determinantes na diversidade e complexidade estrutural das comunidades de plantas (SCARANO, 2002). Portanto, a heterogeneidade ambiental pode explicar a variação encontrada na distribuição e dispersão das variáveis dendrométricas ao longo das tipologias florestais (FIGURAS 5 e 6).

Para as espécies madeireiras (FIGURA 7), a similaridade observada entre as variáveis dendrométricas sugere semelhança entre a forma e o porte dessas espécies. A alometria das árvores representa um indicativo sobre seu crescimento e necessidade luminosa (ALVES & SANTOS, 2002; ZIMMERMAN & BROWN, 1971), sugerindo que as espécies alometricamente semelhantes podem apresentar afinidade ecológica. No entanto, outros fatores como a disponibilidade de recursos e a fase da vida atuam diretamente na alometria das árvores tropicais (ALVES & SANTOS, 2002).

Mesmo com distinções ambientais evidentes (MORELLATO & HADDAD, 2000), as florestas ombrófila e estacional apresentam maior semelhança florística entre si do que com as demais formações florestais da Mata Atlântica (OLIVEIRA-FILHO & FONTES, 2000). Para o estado do Rio de Janeiro, a similaridade entre essas tipologias é corroborada pelos padrões fitogeográficos constatados para a flora (NETTESHEIM et al., 2010). Assim, a similaridade entre as floras e o compartilhamento de espécies esclarece a semelhança encontrada entre as variáveis dendrométricas nas florestas ombrófila e estacional (FIGURAS 5 e 6).

Por outro lado, as restingas ocupam as planícies arenosas costeiras, onde predomina uma vegetação arbustiva (ROCHA et al., 2007, SCARANO, 2002). Essa tipologia possui acentuada diferença florística e estrutural em relação às demais, sobretudo pela presença de espécies típicas adaptadas às características químicas e físicas do solo e ao regime de inundação (MAGNAGO et al., 2013; ASSIS et al., 2011). As condições ambientais das restingas (baixa fertilidade e frequente inundação dos solos) oferecem condições mais restritivas ao estabelecimento das espécies arbóreas (ASSIS et al., 2011), atuando como limitante do tamanho

e da densidade dos indivíduos (MAGNAGO et al., 2013). Logo, as restrições ao desenvolvimento das espécies, acrescida da presença de uma flora quase exclusiva, elucida os menores valores observados e a diferença nas variáveis dendrométricas em relação as demais tipologias (FIGURAS 5 e 6).

Diversas constatações estatísticas sobre a qualidade dos ajustes suportam a calibração de equações de volume por meio dos métodos de regressão linear com transformação logarítmica das variáveis (VIBRANS et al., 2015a). Em uma floresta tropical úmida da Costa Rica, Segura & Kanninen (2005) relataram aumento de até 10% na correlação entre diâmetro e volume das árvores após a transformação logarítmica. Uma vantagem da regressão linear é a facilidade de aplicação das equações geradas, que requer apenas os valores dos coeficientes. Contudo, alguns cuidados são imprescindíveis para o ajuste dessas equações, como a avaliação dos pressupostos da regressão linear e a correção da discrepância logarítmica (DRAPER & SMITH, 1998; VIBRANS et al., 2015a). Adicionalmente, essas equações devem ser usadas com cautela para dados além da amplitude de diâmetro utilizada nos ajustes (SEGURA & KANNINEN, 2005; MAUYA et al., 2014).

5.1.2 Tipologias florestais

Como neste estudo (TABELA 6), Vibrans et al. (2015a) selecionaram o modelo de Schumacher & Hall (4) como o mais adequado para estimativa do volume do fuste nas tipologias florestais da Mata Atlântica em Santa Catarina. Esse modelo é consagrado na área florestal e amplamente utilizado para estimativa do volume de árvores em regiões tropicais (AKINDELE & LEMAY, 2006; VIBRANS et al., 2015a). O modelo de Spurr (3), utilizado neste estudo na forma modificada e selecionado como o mais eficiente para estimativa do volume total (TABELA 6), também é citado como o mais adequado para o volume total na Tanzânia, considerando modelos específicos locais para quatro regiões geográficas (MAUYA et al., 2014).

Esse modelo de variável combinada evita problemas de colinearidade e pode melhorar a qualidade dos ajustes (MENSAH et al., 2016). O diâmetro é a variável preditora de maior importância para estimativa do volume das árvores (SEGURA & KANNINEN, 2005). A correlação linear de Pearson (r) dessa variável é consideravelmente maior para o volume total ($r = 0,95$), em relação ao volume do fuste ($r = 0,90$). No modelo 3, o diâmetro é potencializado ao quadrado, aumentando, assim, o potencial preditivo para estimar o volume total das árvores.

A maior explicação do volume do fuste em relação ao total (TABELA 6) pode estar relacionada ao tamanho da amostra (SEGURA & KANNINEN, 2005), que foi três vezes maior para o volume do fuste. Cabe ressaltar que, para os volumes do fuste e total, a suficiência amostral ótima para obtenção de amostras representativas foi alcançada (APÊNDICE 2). Por outro lado, a elevada variação nos padrões de copas das árvores tropicais pode inserir variabilidade aos dados, afetando os ajustes de equações de volume (MAUYA et al., 2014). De maneira geral, o volume do fuste é mais uniforme que o total e seus atributos geométricos são descritos com maior facilidade pelas variáveis diâmetro e altura (OLIVEIRA et al., 2018).

A maioria das equações dendrométricas desenvolvidas nas florestas tropicais estima apenas o volume do fuste das árvores, ignorando o volume de galhos grossos (SEGURA & KANNINEN, 2005). Em regiões subtropicais da Mata Atlântica, o volume da copa pode representar até 34,5% do volume total das árvores (OLIVEIRA et al., 2018). Neste estudo, a copa representou em média até 30,1% do volume total, variando conforme as tipologias florestais (FES = 28,0%, FOD = 30,7% e RES = 34,2%). Esse volume não deve ser negligenciado nos sistemas de manejo (OLIVEIRA et al., 2018) e nas estimativas de biomassa e carbono florestal (NOGUEIRA et al., 2008; KRAINOVIC et al., 2017).

O uso da altura para estimativa do volume e da biomassa nas florestas tropicais é controverso (HUNTER et al., 2013), sobretudo pelas dificuldades de medição nas florestas densas (SEGURA & KANNINEN, 2005; CASSOL et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2018). No entanto, a inserção da altura como variável preditora da biomassa das árvores melhora significativamente a precisão das estimativas nas florestas tropicais (CHAVE et al., 2005; FELDPAUSCH et al., 2012; HUNTER et al., 2013) e sua medição pode ser aperfeiçoada com a capacitação dos medidores (KITAHARA et al., 2011).

Neste estudo, a inserção da altura como variável preditora aumentou em até 10% a explicação do volume do fuste e em 7% o volume total (TABELA 6). Portanto, em escalas regionais, em que a heterogeneidade ambiental pode aumentar a variabilidade das relações dendrométricas (MAUYA et al., 2014; VIBRANS et al., 2015a), a inserção da altura é recomendada para estimativa da biomassa florestal (FELDPAUSCH et al., 2012). Essa variável representa um importante componente para explicar a forma das árvores e permite o aprimoramento das estimativas de volume individual. Seu uso é ressaltado em situações onde existem uma ampla variação de alturas para um mesmo intervalo de diâmetro (MENSAH et al., 2016), como exemplo das florestas tropicais inequidâneas. Para a estimativa do volume de árvores de grande porte, a inserção da altura total é preferível, pois modera o efeito do diâmetro nas equações (ROLIM et al., 2006; MAUYA et al., 2014).

Como as medições da altura são morosas, recomenda-se a otimização da amostragem para produzir uma relação alométrica local adequada (HUNTER et al., 2013) e, também, para aprimorar as estimativas de volume nas florestas densas. Cabe ressaltar que o modelo 1 (Kopecky & Gehrhardt) de simples entrada fornece estimativas confiáveis e pode ser utilizado (TABELA 6). Devido às dificuldades de mensuração e o aumento do custo com a coleta de dados, o emprego dos modelos de volume que utilizam apenas o diâmetro como variável preditora é uma alternativa aceitável para as operações de manejo nas florestas densas do Brasil (GIMENEZ et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2018). O diâmetro é uma variável disponível em todos os inventários florestais e pode ser medido com precisão e facilidade (SEGURA & KANNINEN, 2005), ampliando a aplicabilidade dos modelos de simples entrada.

A fuga da normalidade observada no extremo das distribuições dos resíduos (FIGURAS 8 e 9) pode indicar mistura de populações, em que essa constatação pode sugerir a existência de subpopulações nas bases de dados. Para a equação genérica, as tipologias florestais representam essas subpopulações. No entanto, mesmo considerando as tipologias isoladamente, a mistura de distribuições é constatada. As condições locais de clima e solo afetam as relações dendrométricas nas florestas tropicais (MAUYA et al., 2014), condicionando assim a existência de diferentes subpopulações dentro da mesma tipologia.

Nas florestas úmidas da Mata Atlântica no Sudeste do Brasil, o efeito da altitude sobre a relação altura x diâmetro é nítida (SCARANELLO et al., 2011). Essas evidências enfatizam a influência do ambiente local nas relações dendrométricas na Mata Atlântica e explicam os indicativos da existência de subpopulações (FIGURAS 8 e 9). Para o volume do fuste na RES, a aderência dos resíduos à reta da distribuição normal teórica indica uma distribuição isolada e com eficiência nas estimativas para essa tipologia. A distribuição isolada da RES também pode ser observada nos resíduos da equação genérica. Neste caso, a fuga ocorreu apenas no extremo inferior da distribuição, o que representa os menores volumes obtidos na RES, devido às restrições dessa tipologia ao desenvolvimento das espécies arbóreas (ASSIS et al., 2011; MAGNAGO et al., 2013).

5.1.3 Espécies madeireiras

Similar às equações ajustadas para as tipologias florestais, os modelos de dupla entrada apresentaram desempenho superior (TABELA 8). Para a espécie *A. graveolens*, o ganho de precisão nas equações foi mais evidente com a inserção da altura, em que essa espécie apresentou maior variação de altura para uma mesma faixa de diâmetro. A altura também atua

como fator de moderação do diâmetro para estimar o volume (MENSAH et al., 2016), aumentando o potencial preditivo dos modelos ($R^2_{aj.}$) e a precisão das estimativas (SEE%). Os maiores erros obtidos para os modelos específicos de dupla entrada foram para a espécie *P. contorta*. Essa espécie é uma das maiores árvores em remanescentes de Floresta Ombrófila Densa no estado do Rio de Janeiro (CYSNEIROS et al., 2015). Como a variabilidade morfológica é mais evidente nas espécies de grande porte (ALVES & SANTOS, 2002), os maiores erros de estimativa do volume são justificados (MAUYA et al., 2014).

A variação interespecífica é mencionada para as relações dendrométricas das árvores tropicais, indicando a influência filogenética nessas relações (ALVES & SANTOS, 2002). Essa variação é mais evidente nas espécies emergentes de grande porte (ALVES & SANTOS, 2002; NIKLAS, 1995), como as do presente estudo. A variabilidade morfológica das espécies esclarece os elevados erros obtidos no processo de validação cruzada. No entanto, a aderência dos valores estimados aos observados (FIGURA 14) indica a ausência de tendências, o que garante o fornecimento de estimativas confiáveis e reforça a aplicação das equações selecionadas.

Para as tipologias florestais do estado de Santa Catarina, a análise de identidade dos modelos de volume indicou a necessidade de equações específicas para cada tipologia separadamente, em detrimento a equação geral (VIBRANS et al., 2015a). No entanto, esses autores constataram falta de adequação para a equação geral. Ao contrário deste estudo, em que as equações genéricas resultaram em ajustes estatisticamente adequados para os volumes do fuste e total (TABELAS 6 e 8). A recomendação de equações específicas para as tipologias florestais da Mata Atlântica, está relacionada com as diferenças florísticas e estruturais existentes entre essas florestas (VIBRANS et al., 2015a).

Mesmo existindo diferenças nas florestas do estado do Rio de Janeiro (NETTESHEIM et al., 2010), as equações genéricas e por tipologia não apresentaram diferença significativa para as estimativas em todos os casos (TABELA 10). Para as equações genéricas, o elevado número de espécies e a maior variabilidade dos dados dendrométricos aparentam inserir variância residual nas estimativas reduzindo a precisão em relação às equações específicas (MAUYA et al., 2014; VIBRANS et al., 2015a). No presente estudo, a precisão e a eficiência das equações genéricas não foram comprometidas (TABELA 10) pela maior variabilidade do conjunto de dados. Ao contrário, possibilitaram o aumento da capacidade de generalização das estimativas.

Por contemplarem maior amplitude das variáveis dendrométricas e maior número de espécies, as equações genéricas permitem aplicações mais amplas (VIBRANS et al., 2015a),

abrangendo uma gama de condições geográficas e biofísicas (MAUYA et al., 2014). Ademais, para as equações ajustadas para as principais espécies madeireiras, evidencia-se que o esforço adicional para a coleta de dados não acarreta ganho expressivo de precisão em relação às equações genéricas (OLIVEIRA et al., 2018). No contexto dos IFN's, os esforços devem se concentrar em modelos que reduzam a variabilidade amostral, por meio de amostras maiores e estatisticamente confiáveis (MCROBERTS & WESTFALL, 2015), como as equações geradas no presente estudo. Portanto, as equações genéricas para estimativa do volume captaram com eficiência a variação das relações dendrométricas entre as tipologias florestais e espécies madeireiras. Essas equações podem ser usadas para todas as florestas do estado do Rio de Janeiro, ao passo que as equações por tipologia e espécie são recomendadas apenas para estimativas locais e específicas.

As equações selecionadas neste estudo são pioneiras para o estado do Rio de Janeiro. Na Mata Atlântica, equações para tipologias e espécies florestais em escala estadual foram desenvolvidas apenas para Santa Catarina (VIBRANS et al., 2015a) e Minas Gerais (SCOLFORO et al., 2008), ambas no âmbito da realização dos Inventários Florestais Estaduais. Além disso, as equações de volume total considerando o volume da copa são raras para as florestas da Mata Atlântica. Um dos motivos é a característica destrutiva das análises (OLIVEIRA et al., 2018), que encontram impedimentos legais na área de abrangência desse Bioma. Portanto, este estudo apresenta a primeira equação de volume total do estrato arbóreo para as tipologias florestais do estado do Rio de Janeiro e uma das poucas desenvolvidas para a Mata Atlântica. Essas equações, além de dar suporte ao manejo das florestas secundárias em Reservas Legais (OLIVEIRA et al., 2018; FANTINI et al., 2019), fornecem estimativas precisas do estoque de crescimento das florestas no contexto do Inventário Florestal Nacional (GSCHWANTNER et al., 2019).

5.2 MODELOS PARA ESTIMATIVA DA ALTURA

5.2.1 Análise exploratória dos dados

A semelhança da relação $h \times d$ entre FES e FOD (FIGURA 15) pode estar relacionada à maior similaridade florística e compartilhamento de espécies existentes entre elas, em relação às demais tipologias florestais da Mata Atlântica no Sudeste brasileiro (OLIVEIRA FILHO & FONTES, 2000; NETTESHEIM et al., 2010; BERTONCELLO et al., 2011). Nesse sentido, a similaridade de espécies também explica a dessemelhança dessas tipologias com RES

(FIGURA 15), que é caracterizada pela presença de espécies típicas adaptadas as condições de inundação, salinidade e baixa fertilidade dos solos (BERGAMIN et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2014; SILVA et al., 2016). Esses fatores ainda atuam como limitante do desenvolvimento dos indivíduos arbóreos (MAGNAGO et al., 2013), esclarecendo os menores valores de diâmetro e altura apresentados e a maior uniformidade da relação alométrica entre essas variáveis (FIGURA 15). De fato, para um mesmo diâmetro, as árvores ao nível do mar são menores, quando comparadas às localizadas em maiores altitudes, devido, possivelmente, aos fatores de estresse do ambiente (SCARANELLO et al., 2012).

Para as espécies madeireiras (FIGURA 16), a similaridade observada na relação $h \times d$ indica semelhança entre a alometria e o porte dessas espécies. Essa constatação sugere que essas espécies podem apresentar afinidade quanto ao crescimento ou necessidade luminosa (ALVES & SANTOS, 2002). De fato, o agrupamento de espécies arbóreas quanto às suas características ecológicas aprimora a descrição da relação $h \times d$ nas florestas tropicais (CASSOL et al., 2018), indicando coerência na relação entre a alometria e os aspectos ecológicos das árvores. Por outro lado, a diferença entre as relações alométricas pode ser resultado da estrutura arquitetônica e fisiológica inerente a cada espécie (POORTER et al., 2006), ou uma consequência local da competição (MENSAH et al., 2016).

5.2.2 Tipologias florestais

A superioridade observada dos modelos logarítmicos para estimativa da altura das árvores em função do diâmetro (TABELA 11) também foi constatada para as tipologias florestais no Sul do Brasil (VIBRANS et al., 2015b). Como vantagem, esses autores mencionam que tais modelos são facilmente ajustados e apresentam potencial para correção da heterocedasticidade. Para uma extensa região tropical, Feldpausch et al. (2011) compararam cinco formas alométricas para descrever a relação $h \times d$ das árvores, constatando que os modelos log-log estão dentre os mais adequados, corroborando a seleção do presente estudo.

Os procedimentos analíticos usados (TABELA 11), revelaram que os modelos lineares de variável natural apresentaram comportamento residual não esperado para a metade dos ajustes realizados, gerando evidências para rejeição da hipótese nula ($\alpha = 0,01$). A seleção do modelo 3 como o mais adequado para a construção das equações é análogo ao encontrado por Vibrans et al. (2015), que o mencionaram como o melhor para diferentes espécies arbóreas e tipologias florestais contidas em sua base de dados.

Como esperado, a equação genérica apresentou erros superiores às específicas ajustadas para as tipologias (TABELA 11). No entanto, a equação genérica captou de forma eficaz a variabilidade dos dados, permitindo maior explicação da altura, com exceção para as árvores da Restinga. Por abrangerem uma gama de espécies e condições ambientais, essas equações permitem maior generalização das estimativas e oferecem um custo efetivo menor com a mensuração, representando uma abordagem relativamente precisa para grandes escalas (FELDPAUSH et al., 2011; MENSAH et al., 2018). No entanto, as equações genéricas para regiões ou continentes podem gerar resultados insatisfatórios quando aplicadas em uma escala local, ressaltados em ambientes distintos do local de desenvolvimento das equações (KEARSLEY et al., 2017; MENSAH et al., 2018; BARBOSA et al., 2019).

Por outro lado, o uso de equações específicas do local pode explicar os efeitos geográficos locais nos padrões de crescimento das comunidades arbóreas (SCARANELLO et al., 2012), esclarecendo os menores erros obtidos pelas equações específicas (TABELA 11). Cabe ressaltar que a equação genérica apresentou ajuste satisfatório e atendeu os pressupostos para regressão linear, ao contrário da equação genérica ajustada para as florestas de Santa Catarina, que apresentou regressão não significativa pelo teste F (VIBRANS et al., 2015b), devido a diferença existente entre as tipologias.

O resultado da análise gráfica dos resíduos (FIGURA 17) foi concordante com os procedimentos analíticos (TABELA 11), indicando comportamento residual esperado para as equações selecionadas, inclusive para as árvores de maior porte, que apresentaram resíduos próximos a zero. Para as espécies tropicais, a afinidade biológica da relação $h \times d$ é mais fraca nas maiores árvores (ALVES & SANTOS, 2002; POORTER et al. 2006), causando os maiores desvios na estimativa da altura (KEARSLEY et al., 2017).

5.2.3 Espécies madeireiras

Assim como para as tipologias florestais, o modelo 3 também foi selecionado como o mais adequado para as espécies madeireiras (TABELA 12). Para as espécies arbóreas dominantes da África do Sul, esse modelo também foi ajustado com sucesso em todos os casos, gerando regressões estatisticamente significativas e estimativas precisas (MENSAH et al., 2016). No mesmo sentido, Vibrans et al. (2015b) selecionaram esse modelo como o mais apropriado para a maioria das espécies contidas em seu banco de dados. Os maiores erros encontrados para *Astronium graveolens* (TABELA 12) eram esperados, pois são consequência da maior variabilidade alométrica apresentada por essa espécie (FIGURA 16).

5.2.4 Hipótese: efeito das tipologias e espécies sobre a equação genérica

Quanto à hipótese elaborada (I), a similaridade da equação genérica em relação as equações para FES e FOD (TABELA 13) é explicada pela semelhança da relação $h \times d$ nessas tipologias que, por abrangerem toda variabilidade do banco de dados (FIGURA 15), apresentam semelhança significativa com as estimativas genéricas. Por outro lado, a perda de precisão da equação genérica em relação a RES (TABELA 13) ressalta a influência da variabilidade entre as subpopulações (FIGURA 15) sobre a qualidade de um ajuste genérico. No presente estudo, o bom ajuste da equação genérica forneceu alta capacidade de generalização das estimativas, em que, apenas para a RES, foi necessário o uso de uma equação específica. Notavelmente, a presença ou ausência de similaridade entre as tipologias florestais (subpopulações) afeta a precisão e a eficiência de equações genéricas em escalas geográficas.

Esses resultados (TABELA 13) são análogos ao observado em regiões subtropicais da Mata Atlântica, onde as tipologias florestais mais semelhantes em estrutura e composição florística apresentaram relação $h \times d$ próximas e, por consequência, similaridade significativa entre as equações ajustadas para estimativa da altura das árvores (VIBRANS et al., 2015b). Essa similaridade pode ser verificada examinando a semelhança entre os parâmetros ajustados para as regressões (FELDPAUSCH et al., 2011). Nesse sentido, Vibrans et al. (2015) acrescentaram que a tipologia com relação $h \times d$ estatisticamente diferente das demais ocasionou a falta de ajuste para a equação genérica.

Como anteriormente reportado, a redução da precisão da equação genérica quando aplicada por tipologia (TABELA 13 e FIGURA 19) era esperada. Esse resultado é similar a outros estudos publicados. Para escalas mais refinadas e locais, os desvios gerados por equações genéricas ajustadas para regiões ou países justificam o desenvolvimento de equações específicas locais para os diferentes ambientes (KEARSLEY et al., 2017; MENSAH et al., 2018; SCARANELLO et al., 2012). No continente africano, por exemplo, a aplicação de equações pantropicais e continentais acarretou superestimativa para florestas da África do Sul, indicando que a alometria das árvores nesse local é diferente das demais regiões (MENSAH et al., 2018). Na bacia central do Congo, os modelos regionais e pantropicais superestimaram a altura das árvores em regiões com dados escassos, em que os erros são propagados para as estimativas de biomassa na região (KEARSLEY et al., 2017). Em escalas geográficas amplas, diferenças climáticas e edáficas entre sítios condicionam tendências nas equações genéricas de altura quando aplicadas em sítios específicos (LI et al., 2015).

A tendência de superestimativa gerada pela equação genérica, quando aplicada para RES (FIGURA 19), condicionou a existência de diferença significativa com a equação específica dessa tipologia (TABELA 13). Essa superestimativa ocorreu devido ao menor porte das árvores (FIGURA 15), ocasionado pelos fatores edáficos que limitam o desenvolvimento das espécies arbóreas (SCARANO, 2002; MAGNAGO et al., 2013). De fato, em solos pobres, os povoamentos florestais desenvolvem-se lentamente e demoram mais para atingir a maturidade, em comparação aos locais com solo fértil (LI et al., 2015), explicando a inclinação mais suave da linha de regressão em relação às demais tipologias (FIGURA 21).

As tipologias florestais apresentaram efeito aditivo diferenciado sobre a relação $h \times d$ das árvores (TABELA 14). No mesmo sentido, diversos estudos relatam a variação da relação $h \times d$ em escalas geográficas caracterizadas por diferenças climáticas, com destaque para gradientes de temperatura e precipitação (FELDPAUSCH et al., 2011; SCARANELLO et al., 2011; CHAVE et al., 2014; TEMESGEN et al., 2014; HULSHOF et al., 2015; KEARSLEY et al., 2017; MENSAH et al., 2018). Neste estudo, o maior coeficiente obtido para FOD (TABELA 14) evidencia o maior efeito dessa tipologia sobre a altura das árvores. Esse efeito pode ser relacionado à maior incidência de chuvas nessas florestas em relação as demais tipologias (NETTESHEIM et al., 2010; IBGE, 2012).

Similar ao presente estudo, em diferentes regiões da África do Sul, os maiores coeficientes alométricos da relação $h \times d$ foram encontrados para locais mais quentes e úmidos (MENSAH et al., 2018). Por outro lado, os menores coeficientes observados para RES são consequências dos fatores ambientais anteriormente reportados, que limitam o desenvolvimento das espécies arbóreas. A diferença entre os interceptos (FIGURA 21) reforça que as tipologias têm efeito diferenciado na equação genérica. No entanto, as equações para FES e FOD foram mais semelhantes à genérica, quanto ao intercepto e o coeficiente angular.

O resultado obtido com o ajuste dos MLEM corroborou o efeito aditivo significativo das tipologias sobre a altura das árvores e revelou que as espécies reduzem o efeito aleatório existente nas estimativas (TABELA 15). Nas florestas da África, o efeito das espécies e sítios sobre a relação $h \times d$ das árvores é notável (KEARSLEY et al., 2017; MENSAH et al., 2018). As espécies arbóreas tropicais possuem características arquitetônicas, ecológicas e fisiológicas específicas (SWAINE & WHITMORE, 1988; WHITMORE, 1989; ALVES & SANTOS, 2002; POORTER et al., 2006), gerando alometrias dependentes da espécie nas florestas naturais (POORTER et al., 2003; MENSAH et al., 2018). Portanto, a quantificação do efeito individual por espécie se torna inviável, principalmente devido à baixa intensidade amostral para a maioria das 84 espécies amostradas (APÊNDICE 1).

Por outro lado, os locais exercem efeitos mais evidentes sobre a alometria das árvores (MENSAH et al., 2018), associados, além do clima e solo, à fatores como composição florística, estrutura e dinâmica sucessional das florestas (BANIN et al., 2012; LI et al., 2015; HULSHOF et al., 2015; VIBRANS et al., 2015b; RIO et al., 2018). Logo, a dependência regional da relação $h \times d$ das árvores tropicais é uma suposição lógica e, assim, é provável que seja mais similar dentro de uma mesma região, incluindo clima, composição de espécies e histórico de perturbação (KEARSLEY et al., 2017). Notavelmente, as espécies arbóreas tropicais otimizam suas estratégias de crescimento de acordo com o ambiente e, portanto, é previsível que a relação $h \times d$ varie entre gradientes ambientais (BANIN et al., 2012; HULSHOF et al., 2015).

Atualmente, a atividade humana continua negligenciada nos modelos de estimativa da altura das árvores por meio do diâmetro nas regiões tropicais (KEARSLEY et al., 2017). No presente estudo, a amostragem das árvores foi realizada em áreas com diferentes históricos de uso, preferencialmente em áreas protegidas (unidades de conservação), visando minimizar o possível efeito das atividades antrópicas sobre a modelagem da alometria $h \times d$ das árvores.

Os resultados revelaram três principais conclusões: 1) foram geradas equações consistentes para estimativa da altura das árvores nas tipologias florestais da Mata Atlântica no estado do Rio de Janeiro; 2) em termos de precisão e eficiência, a equação genérica foi comprometida apenas quando aplicada exclusivamente para RES, devido a diferença significativa da relação $h \times d$ em relação às demais tipologias e; 3) no entanto, o efeito significativo das tipologias e espécies sobre a altura das árvores requer a aplicação de equações específicas locais, a fim de minimizar os efeitos que não podem ser quantificados pelas equações genéricas. Para a escala regional adotada no presente estudo, o efeito das tipologias florestais e espécies explicou uma parte significativa da variação da altura das árvores.

Portanto, os resultados obtidos comprovam o efeito do ambiente local sobre a relação $h \times d$ das árvores, como constatado para maiores escalas nas florestas tropicais. Os resultados do presente estudo permitem perceber diferenças na alometria das árvores entre as tipologias florestais, associadas a um gradiente de temperatura e precipitação. No entanto, novos estudos são necessários para elucidar quais fatores (bióticos e abióticos) são determinantes sobre a relação $h \times d$ das árvores na Mata Atlântica em diferentes escalas espaciais.

5.3 EFEITO DOS FATORES AMBIENTAIS NA ALOMETRIA DAS ÁRVORES

5.3.1 Modelos alométricos geoclimáticos

Recentemente, o efeito do clima ganhou destaque na investigação das relações alométricas em escalas geográficas (FELDPAUSCH et al., 2011; CHAVE et al., 2014; HULSOFF et al., 2015; SCHNEIDER et al., 2018; ZHANG et al., 2018; FORTIN et al., 2019). Mesmo assim, poucos estudos foram desenvolvidos para a compreensão dos efeitos do solo na alometria das árvores (MARSHALL et al., 2012; URBAN et al., 2013; MIOLA & FERNANDES, 2015). Notadamente, a maioria desses estudos investigou o efeito dos ambientes apenas na altura das árvores, porém, as demais relações alométricas foram negligenciadas.

Em relação aos estudos citados anteriormente, o presente estudo aborda o efeito do ambiente na relação do diâmetro com a altura total, espessura de casca e volume do fuste de árvores. Outra abordagem original apresentada é dada pela análise do efeito dos solos nas relações alométricas, que ainda constitui uma lacuna de conhecimento para as florestas naturais. Portanto, esse é o primeiro estudo realizado nas florestas naturais do Brasil com objetivo de investigar o efeito do clima, do solo e dos diferentes ambientes, na alometria das árvores em escalas geográficas. Atualmente, as variáveis climáticas e edáficas são disponibilizadas por meio de mapas para uma grande superfície do globo terrestre (HIJMANS et al., 2005; ALVARES et al., 2014; HENGL et al., 2017). Devido à facilidade de obtenção, não há razões para não serem testadas nos modelos alométricos para largas escalas (FORTIN et al., 2019).

O processo de seleção de covariáveis ambientais para a composição dos modelos geoclimáticos atendeu ao propósito estabelecido. Em termos estatísticos, otimizou-se as variáveis explicativas e maximizou-se o potencial preditivo dos modelos finais (TABELA 16). Portanto, as covariáveis climáticas e edáficas selecionadas têm relação biológica evidente com as variáveis alométricas analisadas (FIGURA 22). Assim, elas apresentam potencial de explicação e predição para as relações alométricas das árvores, compondo modelos geoclimáticos consistentes para a área de estudo.

A adequação dos modelos geoclimáticos para a altura e o volume é confirmada pela aderência completa dos resíduos ao envelope simulado (FIGURA 23). No entanto, a falta de aderência (FIGURA 23) e o reduzido potencial de explicação para a espessura da casca (TABELA 16 e FIGURA 25) sugerem a influência de outros fatores que não foram considerados nos modelos. A modelagem da espessura da casca das árvores é complexa, em

que os modelos gerados são pouco precisos, mesmo baseados na combinação de diversos fatores que afetam o crescimento das árvores (STÄNGLE et al., 2017). Nas florestas tropicais úmidas, as explicações funcionais para a variação da espessura da casca ainda não estão claras (PAINE et al., 2010). Nesse sentido, novos estudos sobre as características das cascas das árvores ainda são necessários (JONES et al., 2019), principalmente para aprimorar o conhecimento dos fatores bióticos e abióticos que determinam essas características.

A superioridade dos modelos geoclimáticos, em relação aos alométricos simples (TABELA 17), comprova que a inserção das covariáveis climáticas e edáficas aprimoram as estimativas alométricas das árvores na escala geográfica do presente estudo. Em consonância, a elevada redução do AIC gerada pelos modelos geoclimáticos justifica a presença das covariáveis ambientais nos modelos (BURNHAN & ANDERSON, 2000; FORTIN et al., 2019). De fato, as características climáticas e edáficas melhoram as estimativas dos atributos das florestas em escalas geográficas.

Nas savanas brasileiras, os teores de areia e argila podem explicar individualmente 11,5% e 7,4% da variabilidade do estoque aéreo de biomassa (ROITMAN et al., 2018), integrando, assim, uma abordagem para estimativas em larga escala no Cerrado. Ao longo de gradientes altitudinais em florestas tropicais, as características climáticas e edáficas, quando associadas às características físicas dos locais, podem explicar até 70% da variação do estoque aéreo de carbono (MARSHALL et al., 2012). Nesse sentido, as covariáveis selecionadas (TABELA 16) podem auxiliar na compreensão ecológica dos efeitos do ambiente, na alometria das árvores na Mata Atlântica.

O efeito mais expressivo da inserção das covariáveis ambientais nos modelos para estimativa da altura e espessura da casca (TABELA 17) é uma evidência que essas variáveis são sensíveis aos fatores do ambiente. Por outro lado, a reduzida influência das covariáveis ambientais sobre a explicação do volume pode indicar que as características da árvore, por si só, explicam com eficiência a variação do volume das árvores em diferentes locais.

As variáveis edáficas CTC e Fração de Areia são as principais covariáveis ambientais que explicam a variação da altura e do volume das árvores (TABELA 17). Nesse sentido, as árvores são maiores onde a CTC é menor e há menor Fração de Areia nos solos (FIGURAS 24 e 26). O maior conteúdo de areia no solo está relacionado com a menor retenção hídrica (ROITMAN et al., 2018). Notadamente, a baixa disponibilidade de água no solo, atua como fator limitante do crescimento das variáveis alométricas das árvores (WAGNER et al., 2012). Isto explica o efeito negativo da fração de areia no solo sobre a altura e volume das árvores.

Por outro lado, a CTC está diretamente relacionada com a fertilidade dos solos (APRILE & LORANDI, 2012). A maior CTC denota a maior capacidade dos solos em reter cátions e fornecer nutrientes para as plantas em um período prolongado (MEURER et al., 2012). Os atributos químicos que definem a fertilidade dos solos na Amazônia, como a CTC e o Fósforo, apresentam forte correlação negativa com o tamanho das árvores (BARALOTO et al., 2011). De fato, para as florestas em solos mais férteis, o afilamento das árvores é maior (LARSON, 1963), ocasionando menor volume dos fustes. Esses resultados estão de acordo com o do presente estudo, em que a CTC dos solos exerceu efeitos negativos na altura e no volume das árvores, com relação biológica inversamente proporcional.

Para o volume do fuste das árvores, a Sazonalidade da Precipitação apresentou efeito positivo (TABELA 17, FIGURA 26). Tal resultado não era esperado, uma vez que, nos locais com maior disponibilidade de água, os estoques de madeira tendem a ser maiores, devido às condições mais favoráveis ao crescimento (SILVEIRA et al., 2019). No entanto, esse efeito está de acordo com o padrão detectado para a escala Pantropical, em que as alturas do fuste e total das árvores tendem a ser maiores onde a sazonalidade da precipitação é maior (FELDPAUSCH et al., 2011; BANIN et al., 2012), conferindo maior volume para os fustes. Esses autores argumentam que o regime variável de precipitação pode reduzir as restrições hidráulicas das árvores, favorecendo o crescimento das variáveis alométricas.

De acordo com os resultados obtidos na TABELA 17 e na Figura 25, as árvores apresentaram cascas mais espessas em solos mais ácidos (menor pH) e climas mais secos (menor precipitação). Na literatura disponível, não há registros de investigações sobre a relação do pH do solo com a espessura da casca das árvores. Assim, não foi possível comparar diretamente esses resultados com outros estudos. No entanto, foi assumida uma associação direta entre o pH e a fertilidade dos solos. Em climas subtropicais e tropicais, a fertilidade dos solos é melhorada com a neutralização de parte da acidez total (ABREU Jr et al., 2003), que representa o aumento do pH à uma faixa adequada. Em regiões de floresta tropical, nos sítios de menor fertilidade, a casca das árvores tende a ser mais espessa (JONES et al., 2019). A mesma tendência é citada para *Picea abies* (L.) H. Karst. em regiões de floresta temperada, relacionada a forte correlação negativa entre a produtividade do local, com a espessura da casca dessa espécie (STÄNGLE et al., 2017).

A maior espessura da casca nos ambientes mais secos era esperada. Notadamente, a casca é impulsionada por sua função defensiva, principalmente contra o fogo (HOFFMAN et al., 2003; PAINE et al., 2010; PAUSAS, 2015), que é facilitado pelas secas mesmo nas florestas tropicais úmidas (HAMMOND & TER STEEGE 1998; VAN NIEUWSTADT & SHEIL 2005).

No entanto, o efeito do fogo na espessura da casca das árvores pode não se estender as florestas úmidas (PAINE et al., 2010). Nesse sentido, as cascas mais espessas podem limitar a respiração pelos tecidos vivos do tronco e a difusão de água e gases entre o câmbio e a atmosfera (CAVALERI et al., 2006; TESKEY et al., 2007), atuando, assim, como um mecanismo para evitar perdas hídricas, principalmente em ambientes mais secos e com menor disponibilidade de água. Esse resultado é consonante a sugestão de Paine et al. (2010), de que a função defensiva generalizada contra ameaças bióticas e abióticas seja um dos fatores mais importantes na modelagem da espessura da casca.

Portanto, os resultados estão de acordo com os estudos citados, confirmando a tendência de as árvores apresentarem cascas mais espessas em solos ácidos e de baixa fertilidade e em climas mais secos, com menor disponibilidade hídrica. Forte correlação entre a localização das árvores e a espessura da casca foi encontrada em regiões de clima temperado (STÄNGLE et al., 2017). Esse resultado sugere que a espessura da casca pode estar relacionada aos fatores locais que ainda não foram investigados, como a competição, a composição de espécies e as características mais detalhadas do solo, como os atributos físico-hídricos.

Do ponto de vista estatístico, as variáveis edáficas apresentaram maior potencial de predição das variáveis alométricas (TABELA 16, FIGURA 22B e APÊNDICE 5). Esse resultado está de acordo com um estudo desenvolvido recentemente, ao longo da paisagem, em florestas secundárias neotropicais da Costa Rica (SANTIGO-GARCIA et al., 2019). Nessa escala da paisagem, os atributos químicos do solo foram os principais fatores que explicaram a variação do estoque aéreo de biomassa, em relação a variáveis como: configuração da paisagem, variáveis bioclimáticas e variáveis da floresta, como a idade.

Por outro lado, a menor importância das variáveis climáticas (FIGURA 22B) pode ser uma evidência que a amostra não está relacionada a padrões espaciais do clima em larga escala (STÄNGLE et al., 2017). O tamanho e o alcance geográfico da amostra são fatores críticos para capturar os efeitos climáticos na alometria das árvores (FORTIN et al., 2019). Ressalta-se que a amostra abrangeu todo território do estado do Rio de Janeiro (FIGURA 2), que é caracterizado por um evidente gradiente climático entre florestas ombrófilas e estacionais (NETTESHEIM et al., 2011). No entanto, para o estado do Rio de Janeiro, aparentemente o gradiente edáfico (RIBEIRO et al., 2018) é mais evidente que o climático (SILVA & DEREZYNSKI, 2014).

5.3.2 Efeito dos ambientes

De acordo com os coeficientes alométricos por tipologia florestal (TABELA 18), a altura das árvores, para um determinado diâmetro, aumenta conforme o aumento da precipitação (TABELA 5), com maior magnitude na FOD. Esse resultado é análogo ao encontrado em uma larga escala geográfica na África do Sul, em que os maiores coeficientes alométricos para a relação $h \times d$ foram encontrados nos locais mais úmidos (MENSAH et al., 2018). No entanto, o volume dos fustes para um mesmo diâmetro foi maior na FES (TABELA 18), que é definida pela estacionalidade bem definida das chuvas (IBGE, 2012). Essa tipologia florestal é caracterizada pela maior temperatura e menor precipitação média anual em relação à FOD (TABELA 5). Nas florestas temperadas, foi comprovada a hipótese que a conicidade do fuste das árvores diminui com o aumento da temperatura média anual e aumenta com o aumento da precipitação média anual (SCHNEIDER et al., 2018). Portanto, o volume das árvores aumenta com maiores temperaturas médias anuais e diminui com o aumento da precipitação no mesmo sentido dos resultados obtidos.

Nas tipologias florestais da Mata Atlântica no Sul do Brasil, os coeficientes alométricos para altura também foram maiores na Floresta Ombrófila Densa (VIBRANS et al., 2015b), ao passo que os coeficientes do volume foram maiores na Floresta Estacional Semidecidual (VIBRANS et al., 2015a). No entanto, ao contrário do presente estudo, das tipologias analisadas por Vibrans et al. (2015a, 2015b), a FOD apresentou a menor precipitação e a FES a maior. Esses resultados, sugerem que existe efeito diferenciado do clima, sobre a alometria das árvores, nas diferentes regiões da Mata Atlântica.

Nesse sentido, o desenvolvimento de estudos que investiguem os efeitos dos ambientes na alometria das árvores, em toda área de abrangência geográfica da Mata Atlântica, trará explicações consistentes da função das características e variáveis ambientais, em determinar a forma das árvores. O atual cenário científico mundial da prática de *OpenScience*, que prevê o acesso público aos dados de pesquisa pode facilitar a implementação desses estudos em largas escalas geográficas, abrindo um importante campo para pesquisa florestal.

Na Restinga, tanto a altura quanto o volume foram consideravelmente inferiores para um determinado diâmetro em relação as demais tipologias (TABELA 18). O menor porte das árvores pode ser explicado pelos fatores ambientais limitantes, aos quais essa tipologia está submetida (TABELA 5). Essa tipologia é caracterizada pelos solos arenosos e de baixa fertilidade (OLIVEIRA et al., 2014; SILVA et al., 2016), que associados a baixa precipitação e altas temperaturas, geram condições desfavoráveis ao crescimento das árvores (SILVEIRA et

al., 2019). Para os solos de regiões tropicais e subtropicais, a alta acidez associada à baixa fertilidade são as principais restrições para o crescimento das plantas e produção agrícola (ABREU Jr et al., 2003).

A tendência crescente da altura das árvores, conforme a elevação nos tipos de vegetação (FIGURA 27B, TABELA 18), também foi observada em um amplo gradiente altitudinal nas florestas tropicais da África (MARSHALL et al., 2012). Nessas florestas, considerando o mesmo diâmetro, a altura das árvores aumenta com aumento da altitude até a estabilização em uma altitude média, onde as árvores exibem as maiores alturas. Os autores mencionam que a maior altura na altitude determinada resultou provavelmente de um equilíbrio entre distúrbios no ambiente, declividade do terreno e clima.

A altitude média (1.000 – 1.250 m.n.m.) do estudo de Marshall et al. (2012) foi superior a maior cota altitudinal do presente estudo (florestas montanas: 500-900 m.n.m.). Portanto, os resultados são compatíveis, em que, aparentemente, o efeito da altitude na altura das árvores é mais intenso nas florestas da Mata Atlântica. Assim, a estabilização da tendência de crescimento da altura com a elevação, ocorre em menores altitudes em relação às florestas africanas. Essa constatação é confirmada pelo estudo desenvolvido por Scaranello et al. (2012), em que, para um diâmetro constante, as árvores são mais baixas no nível do mar, aumentando até uma altitude de 400 m. A partir desse ponto, a altura das árvores tende a diminuir com o aumento da altitude.

Para um mesmo diâmetro, cascas mais espessas foram observadas para as árvores nos ambientes mais extremos da base de dados (TABELA 18). Tanto nas tipologias florestais, quanto nos tipos de vegetação, as cascas são mais espessas na Restinga, que representam condições extremas, como: solos mais arenosos, maiores temperaturas e menor precipitação (TABELA 5). Analisando os tipos de vegetação, após as Restingas, as cascas apresentam maior espessura nas maiores elevações, representadas pelas florestas montanas. Essas florestas situam-se em solos menos férteis (menor pH e CTC) e uma das maiores sazonalidades climáticas (precipitação e temperatura). Os resultados obtidos são suportados por outros estudos desenvolvidos em regiões tropicais. Como função protetora, a casca isola as árvores além do fogo e da herbívoros, contra temperaturas extremas e ventos secos (ROMBERGER et al., 2014). Assim, a casca tende a ser mais espessas para as espécies em ambientes mais secos e propensos a distúrbios, em relação às espécies em florestas úmidas e mais conservadas (HEDGE et al., 1998; HOFFMAN et al., 2003).

A posição vertical das árvores no interior das florestas gerou efeitos significativos e variados nas alometrias (TABELA 18 e FIGURA 27C). A maior altura das árvores para um

mesmo diâmetro, verificada para as árvores de dossel, é esperada. Nas florestas da Mata Atlântica, de fato, as espécies emergentes possuem maiores coeficientes alométricos para a relação $h \times d$, em comparação às espécies dos estratos inferiores (ALVES & SANTOS, 2002), refletindo em maior altura para um mesmo diâmetro. Esses autores relacionam essa diferença às dimensões da copa, que apresentam maior capacidade de expansão acima do dossel, aumentando a superfície fotossintética da árvore.

Em florestas tropicais, a altura do fuste das árvores, é significativamente maior onde há maior área basal e menor densidade de indivíduos (BANIN et al., 2012), como observado no dossel das florestas. Esses autores reportam que a presença de árvores grandes induz a competição, favorecendo o crescimento da árvore em altura. No entanto, as árvores do dossel não apresentaram maior volume do fuste, quando considerado o mesmo diâmetro. É reconhecido que as árvores tem maior afilamento em florestas abertas e com maior iluminação (LARSON, 1963). Portanto, nas árvores de dossel e emergentes, submetidas a menor competição e maior luminosidade, o afilamento do fuste é maior. Ao contrário das árvores intermediárias, que possuem menor afilamento, logo, maior volume para árvores com o mesmo diâmetro.

A casca mais espessa para as árvores de sub-bosque não era esperada, uma vez que a espessura da casca possui forte correlação positiva com o tamanho das árvores (PAINE et al., 2010). O crescimento assintótico da casca observado para as árvores de dossel (FIGURA 27C) pode ser explicado pelos mecanismos ecológicos de defesa das árvores. Se a casca exerce papel importante na defesa da árvore contra alguma ameaça, sua espessura deve crescer assintoticamente com o tamanho do indivíduo, pois além de um certo limite, a espessura adicional não confere vantagens à sobrevivência (WILSON & WITKOSKI, 2003). Esse resultado sugere que as árvores de grande porte do dossel ($dap > 45\text{cm}$) atingiram um tamanho, a partir do qual, a casca não exerce função de defesa tão evidente. Ao contrário das menores árvores (intermediárias e de sub-bosque), em que a casca ainda é um importante mecanismo para a proteção. Esclarecendo assim, a maior espessura das cascas no sub-bosque e menor no dossel, considerando o mesmo diâmetro (TABELA 18).

Cabe ressaltar que esses resultados podem mascarar outros efeitos do ambiente, pois a posição sociológica não considera as variações existentes no clima e solo entre os diferentes locais da amostragem. Além do mais, não é possível prever adequadamente as relações alométricas das árvores apenas pela estatura na fase adulta e posição da copa (ALVES & SANTOS, 2002).

O efeito dos diferentes ambientes como fatores, melhoraram a explicação das variáveis alométricas na área de estudo (TABELA 18). No Cerrado Brasileiro, a variação do estoque aéreo de biomassa é explicada principalmente pela ecoregião, que fornece estimativas superiores as geradas por variáveis edáficas (ROITMAN et al., 2018). Nesse sentido, a ecoregião é uma valiosa variável categórica, pois integra inúmeros fatores ecológicos e climáticos que, provavelmente, afetam os estoques florestais (HUY et al., 2016; ROITMAN et al., 2018). Os ganhos mais expressivos em precisão e eficiência, incorporados pelo tipo de vegetação aos modelos alométricos, sugere que esse fator integra de forma mais eficiente as características ambientais que afetam a alometria das árvores na escala adotada.

Como já mencionado, os tipos de vegetação correspondem à um gradiente de altitude, que se relaciona inversamente com a temperatura. Para escalas geográficas, a literatura reporta maior efeito da temperatura na altura da árvore, quando comparado ao efeito da precipitação (FORTIN et al., 2019). Portanto, é suportada a ideia da seleção do tipo de vegetação, como fator ambiental adequado para investigar e modelar relações alométricas em escalas geográficas na Mata Atlântica. Por sua vez, a posição sociológica é uma característica local da árvore, que está relacionada apenas com a disponibilidade de luz. Assim, desconsidera fatores ambientais importantes. Por esse motivo, incorporou os menores ganhos em informação dentre os diferentes ambientes analisados.

O efeito das variáveis climáticas, pode ocultar o efeito de diferentes estruturas florestais e outras variáveis explicativas que não foram consideradas na modelagem (FORTIN et al., 2019). Para avaliar claramente o efeito dessas variáveis, é recomendado levar em consideração outros fatores, como: competição, status social da árvore e outras variáveis da parcela (FORTIN et al., 2019). Mesmo em escala Pantropical, as variáveis da estrutura da floresta são mais determinantes na arquitetura das árvores, do que as variáveis climáticas (BANIN et al., 2012). Adicionalmente, podem melhorar as estimativas das características alométricas das árvores em florestas naturais (FANG & BAILEY, 1998). O presente estudo não contemplou informações sobre a estrutura da floresta, o que pode mascarar alguns resultados. No entanto, cabe destacar que são apresentadas importantes evidências de como os diferentes fatores do ambiente, podem afetar as relações alométricas. Ressalta-se que, para as florestas do Brasil, em especial para as da Mata Atlântica, a lacuna de conhecimento sobre os efeitos do ambiente na alometria das árvores ainda persiste.

Considerando os resultados obtidos neste estudo e nos estudos citados, surgem evidências que o clima exerce maior efeito sobre os atributos das florestas e das árvores, em largas escalas geográficas, em que há padrões espaciais climáticos bem definidos. Enquanto o

solo exerce efeitos mais evidentes em escalas locais. A menor consistência estatística para a relação alométrica da espessura da casca sugere a existência de outros fatores bióticos ou abióticos determinantes para essa característica. No entanto, não há consenso sobre os fatores ambientais que exercem efeito sobre a espessura da casca (PAINE et al., 2010; JONES et al., 2019). Assim, os resultados observados no presente estudo podem aumentar a compreensão ecológica acerca dessa característica das árvores nas florestas naturais.

Para os diferentes ambientes, o resultado foi compatível com a análise e seleção das variáveis ambientais que exercem efeitos na alometria das árvores. Portanto, a variação na alometria das árvores entre as tipologias florestais e tipos de vegetação, foram explicadas por características edáficas, como CTC, Fração de Areia e pH e climáticas, como Precipitação e Sazonalidade da Precipitação. Por fim, o presente estudo apresenta importantes evidências do efeito determinante do ambiente nas relações alométricas e elucida a variação do comportamento alométrico das árvores em diferentes ambientes. A abordagem aqui apresentada representa o primeiro esforço em larga escala para entender os efeitos do ambiente na alometria das árvores na Mata Atlântica brasileira. No entanto, recomenda-se que os estudos futuros devam ser realizados controlando o efeito da estrutura das florestas e das espécies, para esclarecer os efeitos não explicados pelas variáveis climáticas e edáficas.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As equações alométricas ajustadas neste estudo são pioneiras para o estado do Rio de Janeiro, representando as poucas equações desenvolvidas para larga escala geográfica na Mata Atlântica brasileira. Essas equações apresentam elevado potencial de generalização das estimativas e considerável abrangência geográfica. Devido à consistência e acurácia, essas equações podem ser aplicadas à maioria das florestas do estado. Além do suporte à análise dos dados do Inventário Florestal Nacional, podem subsidiar atividades de manejo em florestas secundárias. Portanto, essas equações representam uma ferramenta de apoio as políticas públicas florestais do estado.

Para a estimativa dos volumes total e do fuste, as equações genéricas forneceram estimativas semelhantes às equações específicas por tipologia florestal e espécie. Para a estimativa da altura das árvores, devido ao efeito significativo das tipologias florestais e espécies, é recomendado o uso de equações específicas. Nesse sentido, o uso de equações específicas pode minimizar as variações da altura não quantificadas pelas equações genéricas.

Os resultados obtidos comprovam o efeito do ambiente local na alometria das árvores para a área de estudo, como constatado em largas escalas nas regiões tropicais. Esses resultados melhoram a compreensão ecológica acerca da variação alométrica das árvores nas florestas naturais. São apresentadas assim, importantes evidências do efeito determinante do clima e do solo nas relações alométricas. Essas evidências elucidam em partes a variação do comportamento alométrico das árvores entre diferentes ambientes.

As variáveis climáticas e edáficas incorporaram ganhos significativos em precisão e acurácia aos modelos alométricos regionais, principalmente para a estimativa da altura e espessura da casca das árvores. Nesse sentido, as variáveis edáficas como Capacidade de Troca Catiônica e Fração de Areia, forneceram a melhor explicação para a variação alométrica das árvores, seguidas de variáveis climáticas relacionadas à Precipitação Média Anual.

Novos estudos ainda são necessários para esclarecer quais fatores, abióticos e bióticos, exercem efeito na relação alométrica das árvores na Mata Atlântica, considerando diferentes escalas espaciais. Recomenda-se que os estudos futuros devam ser realizados controlando o efeito da estrutura das florestas e das diferentes espécies, visando esclarecer as variações não quantificadas pelas variáveis alométricas, climáticas e edáficas.

REFERÊNCIAS

- ABREU JR, C. H.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A. F. Relationship between acidity and chemical properties of Brazilian soils. **Scientia Agricola**, v. 60, p. 337-343, 2003.
- AKINDELE, S. O.; LEMAY, V. M. Development of tree volume equations for common timber species in the tropical rain forest area of Nigeria. **Forest Ecology and Management**, v. 226, p. 41-48, 2006.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711-728, 2013.
- ALVES, L. F.; SANTOS, F. A. M. Tree allometry and crown shape of four tree species in Atlantic rain forest, south-east Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, v. 18, p. 245-260, 2002.
- ALVES, L. F.; VIEIRA, S. A.; SCARANELLO, M. A.; CAMARGO, P. B.; SANTOS, F. A. M.; JOLY, C. A.; MARTINELLI, L. A. Forest structure and live aboveground biomass variation along an elevational gradient of tropical Atlantic moist forest (Brazil). **Forest Ecology and Management**, v. 260, p. 679-691, 2010.
- APG IV. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 181, n. 1, p. 1-20, 2016.
- APRILE, F.; LORANDI, R. Evaluation of cation exchange capacity (CEC) in tropical soils using four different analytical methods. **Journal of Agricultural Science**, v. 4, p. 278-289, 2012.
- ASSIS, M. A.; PRATA, E. M. B.; PEDRONI, F. Florestas de restinga e de terras baixas na planície costeira do sudeste do Brasil: vegetação e heterogeneidade ambiental. **Biota Neotropica**, v. 11, n. 2, p. 103-121, 2011.
- AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. **Forest Measurements**. 5. ed. Long Grove: Waveland Press, 2015. 456 p.
- BAKER, P. J.; WILSON, J. S. A quantitative technique for the identification of canopy stratification in tropical and temperate forests. **Forest Ecology and Management**, v. 127, p. 77-86, 2000.
- BANIN, L.; FELDPAUSCH, T. R.; PHILLIPS, O. L.; BAKER, T. M.; LLOYD, J.; ARETS, E. J. M. M.; BERRY, N. J.; BRADFORD, M. What controls tropical forest architecture? Testing environmental, structural and floristic drivers. **Global Ecology and Biogeography**, v. 21, p. 1179-1190, 2012.
- BARALOTO, C.; RABAUD, S.; MOLTOS, Q.; BLANC, L.; FORTUNEL, C.; HÉRAULT, B.; DÁVILLA, N.; MESONES, I.; RIOS, M.; VALDERRAMA, E.; FINE, P. V. A. Disentangling stand and environmental correlates of aboveground biomass in Amazonian forests. **Global Change Biology**, v. 17, p. 2677-2688, 2011.

BARBOSA, R. I.; RAMÍREZ-NARVÁEZ, P. N.; FEARNSTIDE, P. M.; VILLACORTA, C. D. A.; CARVALHO, L. C. S. Allometric models to estimate tree height in northern Amazonian ecotone forests. **Acta Amazonica**, v. 49, p. 81-90, 2019.

BARRETO, W. F.; LEÃO, F. M.; MENEZES, M. C.; SOUZA, D. V. Equação de volume para apoio ao manejo comunitário de empreendimento florestal em Anapu, Pará. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 80, p. 321-329, 2014.

BARTOSZECK, A. C. P. S.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; OLIVEIRA, E. B. Modelagem da relação hipsométrica para bracatingais da região metropolitana de Curitiba-PR. **Floresta**, v. 32, p. 189-204, 2003.

BASKERVILLE, G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 2, p. 49-53, 1972.

BATES, D.; MAECHLER, M.; BOLKER, B.; WALKER, S. Fitting linear mixed-effects models using lme4. **Journal of Statistical Software**, v. 67, p. 1-48, 2015.

BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z.; MARQUESINI, M. Desempenho de modelos de relações hipsométricas: estudo em três tipos de floresta. **Scientia Forestalis**, v. 60, 149-163, 2001.

BATISTA, J. L. F.; MARQUESINI, M.; VIANA, V. M. Equação de volume para árvores de caxeta (*Tabebuia cassinoides*) no estado de São Paulo e sul do estado do Rio de Janeiro. **Scientia Forestalis**, v. 65, p. 162-175, 2004.

BENNET, N. D.; CROKE, B. F. W.; GUARISO, G.; GUILLAUME, J. H. A.; HAMILTON, S. H.; JAKEMEN, A. J.; MARSILI-LIBELLI, S.; NEWHAM, L. T. H.; NORTON, J. P.; PERRIN, C.; PIERCE, S. A.; ROBSON, B.; SEPPELT, R.; VOINOV, A. A.; FATH, B. D.; ANDREASSIAN, V. Characterising performance of environmental models. **Environmental Modelling & Software**, v. 40, p. 1-20, 2013.

BERGAMIN, R. S.; MÜLLER, S.; MELLO, R. S. P. Indicator species and floristic patterns in different forest formations in southern Atlantic rainforests of Brazil. **Community Ecology**, v. 13, p. 162-170, 2012.

BERTONCELLO, R.; YAMAMOTO, K.; MEIRELES, L. D.; SHEPHERD, G. J. A phytogeographic analysis of cloud forests and other forest subtypes amidst the Atlantic forests in south and southeast Brazil, **Biodiversity and Conservation**, v. 20, p. 3413-3433, 2011.

BOYLE, B., HOPKINS, N., LU, Z., et al. The taxonomic name resolution service: an online tool for automated standardization of plant names. **BMC Bioinformatics**, v. 14, p. 1-15, 2013.

BRAUNISCH, V.; COPPES, J.; ARLETTAZ, R.; SUCHANT, R.; SCHMID, H.; BOLLMANN, K. Selecting from correlated climate variables: a major source of uncertainty for predicting species distributions under climate change. **Ecography**, v. 36, p. 971-983, 2013.

BREHENY, P.; BURCHETT, W. Visualization of regression models using visreg. **The R Journal**, v. 9, p. 56-71, 2017.

BRENA, D. A. Proposição de um sistema de inventário florestal nacional para o Brasil. **Ciência Florestal**, v. 6, p. 109-127, 1996.

BREUSCH, T. S.; PAGAN, A. R. A simple test for heteroscedasticity and random coefficient variation. **Econometrica**, v. 47, n. 5, p. 1287-1294, 1979.

BUONGIORNO, J.; RAUNIKAR, R.; ZHU, S. Consequences of increasing bioenergy demand on wood and forests: An application of the global forest products model. **Journal of Forest Economics**, v. 17, p. 214-229, 2011.

BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. **Model selection and inference: a practical information-theoretic approach**. 2. ed. New York: Springer, 2002. 355 p.

CASSOL, H. L. G.; SHIMABUKURO, Y. E.; CARREIRAS, J. M. B.; MORAES, E. C. Improved tree height estimation of secondary forests in the Brazilian Amazon. **Acta Amazonica**, v. 48, p. 179-190, 2018.

CASTILHO, C. V.; MAGNUSSON, W. E.; OLIVEIRA ARAUJO, R. N.; COSTA PEREIRA, E.; SOUZA, S. S. The use of French spikes to collect botanical vouchers in permanent plots: Evaluation of potential impacts. **Biotropica**, v. 38, p. 555-557, 2006.

CAVALERI, M. A.; OBERBAUER, S. F.; RYAN, M. G. Wood CO₂ efflux in a primary tropical rain forest. **Global Change Biology**, v. 12, p. 2442-2458, 2006

CHAVE, J.; ANDALO, C.; BROWN, S.; CAIRNS, M. A.; CHAMBERS, J. Q.; EAMUS, D.; FÖLSTER, H.; FROMARD, F.; HIGUCHI, N.; KIRA, T.; LESCURE, J. P.; NELSON, B. W.; OGAWA, H.; PUIG, H.; RIÉRA, B.; YAMAKURA, T. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests, **Oecologia**, v. 145, p. 87-99, 2005.

CHAVE, J.; RÉJOU-MÉCHAIN, M.; BÜRGEZ, A. et al. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biology**, v. 20, p. 3177-3190, 2014.

COELHO, M. A. N.; BAUMGRATZ, J. F. A.; LOBÃO, A. Q.; SYLVESTRE, L. S.; TROVÓ, M.; SILVA, L. A. E. Flora of Rio de Janeiro state: An overview of Atlantic Forest diversity. **Rodriguésia**, v. 68, p. 1-11, 2017.

COLPINI, C.; TRAVAGIN, D. P.; SOARES, T. S.; SILVA, V. S. M. Determinação do volume, do fator de forma e da porcentagem de casca de árvores individuais em uma Floresta Ombrófila Aberta na região noroeste de Mato Grosso. **Acta Amazonica**, v. 39, n. 1, p. 97-104, 2009.

CORREIA, J.; FANTINI, A.; PIAZZA, G. Equações volumétricas e fator de forma e de casca para florestas secundárias do litoral de Santa Catarina. **Floresta e Ambiente**, v. 24, e20150237, 2017.

CYSNEIROS, V. C.; MENDONÇA-JÚNIOR, J. O.; GAUL, T. D.; BRAZ, D. M. Diversity, community structure and conservation status of an Atlantic Forest fragment in Rio de Janeiro State, Brazil. **Biota Neotropica**, v. 15, p. 1-15, 2015.

CYSNEIROS, V. C.; PELISSARI, A. L.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; SOUZA, L. Modelos genéricos e específicos para estimativa do volume comercial em uma floresta sob concessão na Amazônia. **Scientia Forestalis**, v. 45, p. 295-304, 2017.

CURTO, R. A.; LOUREIRO, G. H.; MÔRA, R.; MIRANDA, R. O. V.; PÉLLICO NETTO, S.; SILVA, G. F. Relações hipsométricas em floresta estacional semidecidual. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 57, p. 57-66, 2014.

DAVID, H. C. **Estimating and mapping forest variables of the Brazilian National Forest Inventory to finer scales**. 2018. 117 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

DIAS, A. S.; SANTOS, K.; SANTOS, F. A. M.; MARTIS, F. R. How liana loads alter tree allometry in tropical forests. **Plant Ecology**, v. 218, p. 119-125, 2016.

DRAPPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998. 704 p.

EISENLOHR, P. V.; OLIVEIRA-FILHO, A. T. Tree species composition in areas of Atlantic Forest in southeastern Brazil is consistent with a new system for classifying the vegetation of South America. **Acta Botanica Brasilica**, v. 28, p. 227-233, 2014.

ELLISON, A. M. **Exploratory data analysis and graphic display: design and analysis of ecological experiments**. New York: Chapman & Hall, 1993. 281 p.

FANG, Z.; BAILEY, R. L. Height-diameter models for tropical forests on Hainan Island in southern China. **Forest Ecology and Management**, v. 110, p. 315-327, 1998.

FANTINI, A. C.; SCHUCH, C.; SIMINSKI, A.; SIDIQUE, I. Small-scale management of secondary forests in the Brazilian Atlantic Forest. **Floresta & Ambiente**, v. 26, e20170690, 2019.

FARAWAY, J. J. **Extending the linear model with R generalized linear, mixed effects and nonparametric regression models**. Boca Raton: Chapman & Hall, 2006. 312 p.

FAYOLLE, A.; NGOMANDA, A.; MBASI, M. et al. A regional allometry for the Congo basin forests based on the largest ever destructive sampling. **Forest Ecology and Management**, v. 430, p. 228-240, 2018.

FELDPAUSCH, T. R.; BANIN, L.; PHILLIPS, O. L. et al. Height-diameter allometry of tropical forest trees. **Biogeosciences**, v. 8, p. 1081-1106, 2011.

FELDPAUSCH, T. R.; LLOYD, J.; LEWIS, S. L. et al. Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. **Biogeosciences**, v. 9, p. 3381-3403, 2012.

FIGUEIREDO-FILHO, A.; MACHADO, S. A.; MIRANDA, R. O. V.; RETSLAFF, F. A. S. **Compêndio de equações de volume e de afilamento de espécies florestais plantadas e nativas para as regiões geográficas do Brasil**. Curitiba: Editado pelos Autores, 2014. 306 p.

FORRESTER, D. I.; BENNETER, A.; BOURIAUD, O.; BAUHUS, J. Diversity and competition influence tree allometric relationships: Developing functions for mixed species forests. **Journal of Ecology**, v. 105, p. 761-774, 2017.

FORTIN, M.; VAN COUWENBERGHE, R.; PEREZ, V.; PIEDALLU, C. Evidence of climate effects on the height-diameter relationships of tree species. **Annals of Forest Science**, v. 76, p. 1-20, 2019.

FOX, J.; WEISBERG, S. **An R companion to applied regression**. 3. ed. London: SAGE Publications, 2018. 474 p.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA/INPE. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica**. São Paulo: SOSMA, 2018. 35 p.

GIMENEZ, B. O.; DANIELLI, F. E.; OLIVEIRA, C. K. A.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N. Equações volumétricas para espécies comerciais madeireiras do sul do estado de Roraima. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 106, p. 291-301, 2015.

GIMENEZ, B. O.; SANTOS, L. T.; GEBARA, J.; CELES, C. H. S.; DURGANTE, F. M.; LIMA, A. J. N.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N. Tree climbing techniques and volume equations for *Eschweilera* (Matá-Matá), a hyperdominant genus in the Amazon Forest. **Forests**, v. 154, p. 1-11, 2017.

GROSS, J.; LIGGES, U. **nortest**: Tests for normality. R package version v1.0-4, 2015. 10 p.

GSCHWANTNER, T.; ALBERDI, I.; BALÁZS, A. et al. Harmonisation of stem volume estimates in European National Forest Inventory. **Annals of Forest Science**, v. 76, p. 1-24, 2017.

HAIR, J. F. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Multivariate data analyses**. 3. ed. New York: Prentice Hall, 1995. 757 p.

HAMMOND, D.; TER STEEGE, H. Propensity for fire in Guianan rainforests. **Conservation Biology**, v. 12, p. 944-947, 1998.

HEDGE, V.; CHANDRAN, M. D. S.; GADGIL, M. Variation in bark thickness in a tropical forest community of western ghats in India. **Functional Ecology**, v. 12, p. 313-318, 1998.

HENGL, T.; JESUS, J. M.; HEUVELINK, G. B. M.; GONZALEZ, M. R.; KILIBARDA, M.; BLAGOTIC, A.; SHANGGUAN, W.; WRIGHT, M. N.; GENG, X.; BAUER-MARSCHALLINGER, B.; GUEVARA, M. A.; VARGAS, R.; MACMILLAN, R. A.; BATJES, N. H.; LEENAARS, J. G. B.; RIBEIRO, E.; WHEELER, I.; MANTEL, S.; KEMPEN, B. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. **PlosOne**, v. 12, e0169748, 2017.

- HIGUCHI, N.; RAMM, W. Developing bole wood volume equations for a group of tree species of Central Amazon (Brazil). **Commonwealth Forestry Review**, v. 64, n. 1, p. 33-41, 1985.
- HIJMANS, R. J.; CAMERON, S. E.; PARRA, J. L.; JONES, P. G.; JARVIS, A. Very high-resolution interpolated climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 25, p. 1965-1978, 2005.
- HOFFMAN, W. A.; ORTHEN, B.; NASCIMENTO, P. K. V. Comparative fire ecology of tropical savanna and forest trees. **Functional Ecology**, v. 17, p. 720-726, 2003.
- HULSHOF, C. M.; SWENSON, N. G.; WEISER, M. D. Tree height-diameter allometry across the United States, **Ecology and Evolution**, v. 5, p. 1193-1204, 2015.
- HUNTER, M. O.; KELLER, M.; VICTORIA, D.; MORTON, D. C. Tree height and tropical forest biomass estimation. **Biogeosciences**, v. 10, p. 8385-8399, 2013.
- HUY, B.; KRALICEK, K.; POUDEL, K. P.; PHUONG, V.T.; KHOA, P. V.; HUNG, N. D. et al. Allometric equations for estimating tree aboveground biomass in evergreen broadleaf forests of Vietnam. **Forest Ecology and Management**, v. 382, p. 193-205, 2016.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação Brasileira**. 2. ed. Local: Editora, 2012. 271 p.
- JARA, M. C.; HENRY, M.; RÉJOU-MECHAIN, M. et al. Guidelines for documenting and reporting tree allometric equations. **Annals of Forest Science**, v. 72, p. 763-768, 2015.
- JOLY, C. A.; AIDAR, M. P. M.; KLINK, C. A. et al. Evolution of the Brazilian phytogeography classification systems: implications for biodiversity conservation. **Ciência e Cultura**, v. 51, p. 331-346, 1999.
- JONES, J. M.; HEINEMAN, K. D.; DALLING, J. W. Soil and species effects on bark nutrient storage in a premontane tropical forest. **Plant Soil**, v. 438, p. 347-360, 2019.
- KEARSLEY, E.; MOONEN, P. C. J.; HUFKENS, K.; DOETTERL, S.; LISINGO, J.; BOSELA, F. B.; BOECKX, P.; BEECKMAN, H.; VERBEECK, H. Model performance of tree height-diameter relationships in the central Congo Basin. **Annals of Forest Science**, v. 75, p. 1-13, 2017.
- KITAHARA, F.; MIZOUE, N.; YOSHIDA, S. Effects of training for inexperienced surveyors on data quality of tree diameter and height measurements. **Silva Fennica**, v. 44, n. 4, p. 657-667, 2011.
- KLEINN, C. The renaissance of National Forest Inventories (NFIs) in the context of the international conventions – a discussion paper on context, background and justification of NFIs. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, p. 369-379, 2017.
- KORNER, C. The use of “altitude” in ecological research. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 22, p. 569-574, 2007.

- KRAINOVIC, P.; ALMEIDA, D.; SAMPAIO, P. New allometric equations to support sustainable plantation management of rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) in the Central Amazon. **Forests**, v. 8, p. 1-28, 2017.
- KUHN, M.; WING, J.; WESTON, S.; WILLIAMS, A.; KEEFER, C.; ENGELHARDT, A.; COOPER, T.; MAYER, Z. **caret**: Classification and regression training. R package version v6.0.77, 2018. 216 p.
- LAMAN, T. G. Safety recommendations for climbing rain forest trees with “single rope technique”. **Biotropica**, v. 27, p. 406-409, 1995.
- LARJAVAARA, M.; MULLER-LANDAU, H. C. Measuring tree height: a quantitative comparison of two common field methods in a moist tropical forest. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 4, p. 793-801, 2013.
- LARSON, P. R. Stem form development of forest trees. **Forest Science**, v. 9, p. 1-42, 1963.
- LE, S.; JOSSE, J.; HUSSON, F. FactoMineR: An R package for multivariate analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 25, p. 1-18, 2008.
- LEWIS, S. L.; SONKÉ, B.; SUNDERLAND, T. et al. Above-ground biomass and structure of 260 African tropical forests. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 368, e20120295, 2013.
- LI, Y.; DENG, X.; HUANG, Z.; XIANG, W.; YAN, W.; LEI, P.; ZHOU, X.; PENG, C. Development and evaluation of models for the relationship between tree height and diameter at breast height for chinese-fir plantations in subtropical China. **Plos One**, v. 10, e0125118, 2015.
- MACLEOD, C. D. Assessing the shape and topology of allometric relationships with body mass: a case study using testes mass allometry. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 1, p. 359-370, 2010.
- MAGNANO, L. F. S.; MARTINS, S. V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; NERI, A. V. Structure and diversity of *restingas* along a flood gradient in southeastern Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 27, n. 4, p. 801-809, 2013.
- MARSHALL, A. R.; WILLCOCK, S.; PLATTS, P. J.; LOVETT, J. C.; BALMFORD, A.; BURGESS, N. D.; LATHAM, J. E.; MUNISHI, P. K. T.; SALTER, R.; SHIRIMA, D. D.; LEWIS, S. L. Measuring and modelling above-ground carbon and tree allometry along a tropical elevation gradient. **Biological Conservation**, v. 154, p. 20-33, 2012.
- MAUYA, E. W.; MUGASHA, W. A.; ZAHABU, E.; BOLLANDSAS, Q. M.; EID, T. Models for estimation of tree volume in the miombo woodlands of Tanzania. **Southern Forests**, v. 76, n. 4, p. 209-219, 2014.
- MCROBERTS, R. E.; TOMPPA, E. O.; SCHADAUER, K.; STÄHL, G. Harmonizing national forest inventories. **Forest Science**, v. 58, p. 189-190, 2012.

- MCROBERTS, R. E.; WESTFALL, J. A. Propagating uncertainty through individual tree volume model predictions to large-area volume estimates. **Annals of Forest Science**, v. 73, p. 625-633, 2015.
- MENSAH, S.; PIENAAR, O. L.; KUNNEKE, A.; TOIT, B.; SEYDACK, A.; UHL, E.; PRETZSCH, H.; SEIFERT, T. Height-diameter allometry in South Africa's indigenous high forests: Assessing generic models performance and function forms. **Forest Ecology and Management**, v. 410, p. 1-11, 2018.
- MEURER, E. J.; RHEINHEIMER, R. D.; BISSANI, C. A. Fenômenos de sorção em solos. In: Meurer, E. J. **Fundamentos de química do solo**. 5. ed. Porto Alegre: Evan Graf, 2012.
- MIOLA, D. T. B.; FERNANDES, G. W. Growing straight versus growing decumbent: soil quality and allometry in *Syagrus glaucescens* Becc. (Arecaceae), an endemic and threatened palm of the Espinhaço Mountains, Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 29, p. 417-424, 2015.
- MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A. B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, p. 853-858, 2000.
- MORAIS, V. A.; MELLO, J. M.; GOMIDE, L. R.; SCOLFORO, J. R. S.; ARAÚJO, E. J. G.; RUFINI, A. L. Influence of diameter measuring height on the adjustment of volume and biomass equations of cerrado in Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, p. 230-239, 2014.
- MORAL, R. A.; HINDE, J.; DEMÉTRIO, C. G. B. Half-normal plots and overdispersed models in R: the hnp package. **Journal of Statistical Software**, v. 81, p. 1-23, 2017.
- MORELLATO, L. P. C.; HADDAD, C. F. B. Introduction: The Brazilian Atlantic Forest. **Biotropica**, v. 32, n. 4, p. 786-792, 2000.
- NAKAGAWA, S.; SCHIELZETH, H. A general and simple method for obtaining R^2 from generalized linear mixed-effects models. **Methods in Ecology**, v. 4, p. 133-142, 2013.
- NASCIMENTO, L. B.; BRANDES, A. F. N.; VALENTE, F. D. W.; TAMAIO, N. Anatomical identification of commercialized wood in the state of Rio de Janeiro, Brazil. **Brazilian Journal of Botany**, v. 40, p. 291-329, 2017.
- NETTESHEIM, F. C.; MENEZES, L. F. T.; CARVALHO, D. C.; CONDE, M. M. S.; ARAÚJO, D. S. Influence of environmental variation on Atlantic Forest tree-shrub-layer phytogeography in southeast Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 24, n. 2, p. 369-377, 2010.
- NOGUEIRA, E. M.; FEARNSIDE, P. M.; NELSON, B. W.; BARBOSA, R. I.; KEIZER, E. W. H. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. **Forest Ecology and Management**, v. 256, p. 1853-1867, 2008.
- OLIVEIRA, A. A.; VICENTINI, A.; CHAVE, J.; CASTANHO, C. T.; DAVIES, S. J.; MARTINI, A. M. Z.; LIMA, R. A. F.; RIBEIRO, R. R.; IRIBAR, A.; SOUZA, V. C. Habitat specialization and phylogenetic structure of tree species in a coastal Brazilian white-sand forest. **Journal of Plant Ecology**, v. 7, p. 134-144, 2014.

OLIVEIRA, L. Z.; KLITZKE, A. R.; FANTINI, A. C.; ULLER, H. F.; CORREIA, J.; VIBRANS, A. C. Robust volumetric models for supporting the management of secondary forest stands in the Southern Brazilian Atlantic Forest. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, p. 1-16, 2018.

OLIVEIRA FILHO, A. T.; FONTES, M. A. L. Patterns of floristic differentiation among Atlantic Forests in Southeastern Brazil and the influence of climate. **Biotropica** v. 32, n. 4, p. 793-810, 2000.

PAGÈS, J. Analyse factorielle multiple appliquée aux variables qualitatives et aux données mixtes. **Revue de statistique appliquée**, v. 4, p. 5-37, 2002.

PAINE, C. E. T.; STAHL, C.; COURTOIS, E. A.; PATIÑO, S.; SARMIENTO, C.; BARALOTO, C. Functional explanations for variation in bark thickness in tropical rain forest trees. **Functional Ecology**, v. 24, p. 1202-1210, 2010.

PAOLI, G. D.; CURRAN, L. M.; SLIK, J. W. F. Soil nutrients affect spatial patterns of aboveground biomass and emergent tree density in southwestern Borneo. **Oecologia**, v. 155, p. 287-299, 2008.

PAUSAS, J. G. Bark thickness and fire regime. **Functional Ecology**, v. 29, p. 315-327, 2015.

POORTER, L.; BONGERS, F.; STERCK, F. J.; WÖLL, H. Architecture of 53 rain forest tree species differing in adult stature and shade tolerance. **Ecology**, v. 84, p. 602-608, 2003.

POORTER, L.; BONGERS, L.; BONGERS, F. Architecture of 54 moist-forest tree species: traits, trade-offs, and functional groups. **Ecology**, v. 87, p. 1289-1301, 2006.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2019.

RAUNIKAR, R.; BUONGIORNO, J.; TURNER, J. A.; ZHU, S. Global outlook for wood and forests with the bioenergy demand implied by scenarios of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Forest Policy and Economics**, v. 12, p. 48-56, 2010.

RAZALI, N. M.; WAH, Y. B. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. **Journal of Statistical Modeling and Analytics**, v. 2, n. 1, p. 21-33, 2011.

REZENDE, V. L.; MIRANDA, P. L. S.; MEYER, L.; MOREIRA, C. V.; LINHARES, M. F. M.; OLIVEIRA-FILHO, A. T.; EISENLOHR, P. V. Tree species composition and richness along altitudinal gradients as a tool for conservation decisions: the case of Atlantic semideciduous forest. **Biodiversity and Conservation**, v. 24, p. 2149-2163, 2015.

RIBEIRO, M. C.; METZGER, J. P.; MARTENSEN, A. C.; PONZONI, F. J.; HIROTA, M. M. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, p. 1141-1153, 2009.

- RIBEIRO, F. C. A.; LAURIA, D. C.; SILVA, J. I. R.; LIMA, E. S. A.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; PÉREZ, D. V. Baseline and quality reference values for natural radionuclides in soils of Rio de Janeiro State, Brazil. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 42, e0170146, 2018.
- RÍO, M.; BRAVO-OVIEDO, A.; RUIZ-PEINADO, R.; CONDÉS, S. Tree allometry variation in response to intra- and inter-specific competitions. **Trees**, v. 33, p. 121-138, 2019.
- ROCHA, C. F. D.; BERGALLO, H. G.; VAN SLUYS, M.; ALVES, M. A. S.; JAMEL, C. E. The remnants of *restinga* habitats in the Brazilian Atlantic Forest of Rio de Janeiro state, Brazil: Habitat loss and risk of disappearance. **Brazilian Journal of Biology**, v. 67, n. 2, p. 263-273, 2007.
- RODRIGUES, A. C.; VILLA, P. M.; NERI, A. V. Fine-scale topography shape richness, community composition, stem and biomass hyperdominant species in Brazilian Atlantic forest. **Ecological Indicators**, v. 102, p. 208-217, 2019.
- ROITMAN, I.; BUSTAMANTE, M. M. C.; HAIDAR, R. F. et al. Optimizing biomass estimates of savanna woodland at different spatial scales in the Brazilian Cerrado: Re-evaluating allometric equations and environmental influences. **PlosOne**, v. 13, e0196742, 2018.
- ROLIM, S. G.; COUTO, H. T. Z.; JESUS, R. M.; FRANÇA, J. T. Modelos volumétricos para a Floresta Nacional do Taipé-Aquirí, Serra dos Carajás. **Acta Amazonica**, v. 36, n. 1, p. 106-114, 2006.
- ROMBERGER, J. A.; HEJNOWICZ, Z.; HILL, J. F. **Plant structure: function and development**. Berlin: Springer-Verlag, 2014. 548 p.
- ROUDER, J. N.; ENGELHARDT, C. R.; MCCABE, S.; MOREY, R. D. Model comparison in ANOVA. **Psychonomic Bulletin & Review**, v. 23, p. 1779-1786, 2016.
- SAFFORD, H. D. Brazilian Páramos IV. Phytogeography of the campos de altitude. **Journal of Biogeography**, v. 34, p. 1701-1722, 2007.
- SALINAS-MELGOZA, M. A.; SKUTSCH, M.; LOVETT, J. C. Predicting aboveground forest biomass with topographic variables in human-impacted tropical dry forest landscapes. **Ecosphere**, v. 9, e02063, 2018.
- SAMUEL-ROSA, A. **pedometrics: Pedometric tools and techniques**. R package version v0.6-6, 2020. 48 p.
- SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; ROGLIN, A.; PIMENTAL, A. Relações diâmetro-altura para espécies lenhosas em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista no Sul do Paraná. **Iheringia**, v. 68, p. 103-114, 2013.
- SANTIAGO-GARCÍA, R. J.; FINEGAN, B.; BOSQUE-PÉREZ, N. A. Soil is the main predictor of secondary rain forest estimated aboveground biomass across a neotropical landscape. **Biotropica**, v. 51, p. 1-8, 2019.

SCARANELLO, M A. S.; ALVES, L. A.; VIEIRA, S. A.; CAMARGO, P. B.; JOLY, C. A.; MARTINELLI, L. A. Height-diameter relationships of tropical Atlantic moist forest trees in southeastern Brazil. **Scientia Agricola**, v. 69, n. 1, p. 26-37, 2011.

SCARANO, F. R. Structure, function and floristic relationships of plant communities in stressful habitats marginal to the Brazilian Atlantic Rainforest. **Annals of Botany**, v. 90, p. 517-524, 2002.

SCHLOERKE, B.; CROWLEY, J.; COOK, D.; BRIATTE, F.; MARBACH, M.; THOEN, E.; ELBERG, A.; LARMARANGE, J. **GGally**: Extension to 'ggplot2'. R package version 1.4.0., 2018. 94 p.

SCHNEIDER, R.; FRANCESCHINIA, T.; FORTIN, M.; SAUCIER, J. P. Climate induced changes in the stem form of 5 North American tree species. **Forest Ecology and Management**, v. 427, p. 446-455, 2018.

SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D.; ACERBI-JÚNIOR, F. W. **Equações de volume, peso de matéria seca e carbono para diferentes fisionomias da flora nativa**. Lavras: Editora UFLA, 2008. 216 p.

SCOLFORO, H. F.; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, C. R.; MELLO, J. M.; FERRAZ FILHO, A. C. Spatial distribution of aboveground carbon stock of the arboreal vegetation in Brazilian biomes of Savanna, Atlantic Forest and Semi-Arid Woodland. **Plos One**, v. 10, e0128781, 2014.

SCOLFORO, H. F.; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M.; SILVA, C. P. C.; MORAIS, V. A. Spatial interpolators for improving the mapping of carbon stock of the arboreal vegetation in Brazilian biomes of Atlantic forest and Savanna. **Forest Ecology and Management**, v. 376, p. 24-35, 2016.

SEGURA, M.; KANNINEN, M. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. **Biotropica**, v. 37, n. 1, p. 2-8, 2005.

SFB - SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Inventário Florestal Nacional: Rio de Janeiro**: Principais resultados. Brasília: MMA, 2018. 116 p.

SILESHI, G. W. A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures. **Forest Ecology and Management**, v. 329, p. 237-254, 2014.

SILVA, W. L.; DEREZYNSKI, C. P. Caracterização climatológica e tendências observadas em extremos climáticos no Estado do Rio de Janeiro. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 37, p. 123-138, 2014.

SILVA, A. C.; SILVA, J. L. A.; SOUZA, A. F. Determinants of variation in heath vegetation structure on coastal dune fields in northeastern South America. **Brazilian Journal of Botany**, v. 39, p. 605-612, 2016.

SILVEIRA, E. M. O.; REIS, A. A.; TERRA, M. C. N. S.; WITHEY, K. D.; MELLO, J. M.; ACERBI-JÚNIOR, F. W.; FERRAZ FILHO, A. C.; MELLO, C. R. Spatial distribution of

wood volume in Brazilian savannas. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 91, e20180666, 2019.

SLIK, J. W. F.; AIBA, S. I.; BREARLEY, F. Q.; CANNON, C. H.; FORSEHD, O.; KITAYAMA, K.; NAGAMASU, H.; NILUS, R.; PAYNE, J.; PAOLI, G.; POLSEN, A. D.; RAES, N.; SHEIL, D.; SIDIYASA, K.; SUZUKI, E.; VALKENBURG, J. L. C. H. Environmental correlates of tree biomass, basal area, wood specific gravity and stem density gradients in Borneo's tropical forests. **Global Ecology and Biogeography**, v. 19, p. 50-60, 2010.

SOARES, C. P. B.; MARTINS, F. B.; LEITE-JÚNIOR, H. U.; SILVA, G. F.; FIGUEIREDO, L. T. M. Equações hipsométricas, volumétricas e de taper para onze espécies nativas. **Revista Árvore**, v. 35, n. 5, p. 1039-1051, 2011.

SOUSA NETO, E.; CARMO, J. B.; KELLER, M.; MARTINS, S. C.; ALVES, L. F.; VIEIRA, S. A.; PICCOLO, M. C.; CAMARGO, P.; COUTO, H. T. Z.; JOLY, C. A.; MARTINELLI, L. A. Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide, methane and carbon dioxide in a gradient of elevation in the coastal Brazilian Atlantic forest. **Biogeosciences Discussion**, v. 7, p. 5227-5252, 2010.

SWAINE, M. D.; WHITMORE, T. C. On the definition of ecological species groups in tropical rain forests. **Vegetation**, v. 75, p. 81-86, 1988.

STÄNGLE, S. M.; SAUTER, U. H.; DORMANN, C. F. Comparison of models for estimating bark thickness of *Picea abies* in southwest Germany: the role of tree, stand, and environmental factors. **Annals of Forest Science**, v. 74, p. 2-10, 2017.

TABARELLI, M.; PINTO, L. P.; SILVA, J. M. C.; HIROTA, M.; BEDE, L. Challenges and opportunities for biodiversity conservation in the Brazilian Atlantic Forest. **Conservation Biology**, v. 19, p. 695-700, 2005.

TEMESGEN, H.; ZHANG, C. H.; ZHAO, X. H. Modelling tree height-diameter relationships in multi-species and multi-layered forests: A large observational study from Northeast China. **Forest Ecology and Management**, v. 316, p. 78-89, 2014.

TESKEY, R.; SAVEYN, A.; STEPPE, K.; MCGUIRE, M. Origin, fate and significance of CO₂ in tree stems. **New Phytologist**, v. 177, p. 17-32, 2007.

THAINES, F.; BRAZ, E. M.; MATTOS, P. P.; THAINES, A. A. R. Equações para a estimativa de volume de madeira para a região da bacia do Rio Ituxi, Lábrea, AM. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 64, p. 283-289, 2010.

TONINI, H.; BORGES, R. A. Equação de volume para espécies comerciais em Floresta Ombrófila Densa no Sul de Roraima. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 82, p. 11-117, 2015.

URBAN, J.; HOLUSOVA, K.; MENSIK, L.; CERMAK, J.; KANTOR, P. Tree allometry of Douglas fir and Norway spruce on a nutrient-poor and a nutrient-rich site. **Trees**, v. 27, p. 97-110, 2013.

VAN NIEUWSTADT, M. G. L.; SHEIL, D. Drought, fire and tree survival in a Borneo rain forest, East Kalimantan, Indonesia. **Journal of Ecology**, v. 93, p. 191-201, 2005.

VIBRANS, A. C.; MOSER, P.; OLIVEIRA, L. Z.; MAÇANEIRO, J. P. Generic and specific stem volume models for three subtropical forest types in southern Brazil. **Annals of Forest Science**, v. 72, p. 865-874, 2015a.

VIBRANS, A. C.; MOSER, P.; OLIVEIRA, L. Z.; MAÇANEIRO, J. P. Height-diameter models for three subtropical forest types in southern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 39, p. 205-215, 2015b.

VIDAL, C.; ALBERDI, I.; REDMOND, J.; VESTMAN, M.; LANZ, A.; SCHADAUER, K. The role of European National Forest Inventories for international forestry reporting. **Annals of Forest Science**, v. 73, p. 793-806, 2016.

VON GADOW, K.; PUKKALA, T.; TOMÉ, M. **Sustainable forest management**. New York: Springer, 2000. 345 p.

WAGNER, F.; ROSSI, V.; STAHL, C.; BONAL, D.; HERAULT, B. Water availability is the main climate driver of neotropical tree growth. **Plos One**, v. 7, e34074, 2012.

WEISBERG, S. **Applied linear regression**. 4. ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2014. 340p.

WERNECK, M. S.; SOBRAL, M. E. G.; ROCHA, C. T. V.; LANDAU, E. C.; STEHMANN, R. Distribution and endemism of angiosperms in the Atlantic Forest. **Natureza e Conservação**, v. 9, p. 188-193, 2011.

WHITMORE, T. C. Canopy gaps and two major groups of forest trees. **Ecology**, v. 70, p. 536-538, 1989.

WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant graphics for data analysis**. New York: Springer-Verlag, 2016. 217 p.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981.

WILSON, B. G.; WITKOWSKI, E. T. F. Seed banks, bark thickness and change in age and size structure (1978-1999) of the African savanna tree, *Burkea africana*. **Plant Ecology**, v. 167, p. 151-162, 2003.

ZAMBRANO-BIGIARINI, M. **hydroGOF**: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series. 2017. 76 p.

ZHANG, X.; CHHIN, S.; FU, L.; LU, L.; DUAN, A.; ZHANG, J. Climate-sensitive tree height–diameter allometry for Chinese fir in southern China. **Forestry**, v. 92, p. 167-176, 2018.

ZIMMERMANN, M. H.; BROWN, C. L. **Trees: structure and function**. New York: Springer-Verlag, 1971. 336 p.

ZUUR, A. F.; IENO, E. N.; WALKER, N. J.; SABELIEV, A. A.; SMITH, G. M. **Mixed effects models and extensions in ecology with R**. New York: Springer-Verlag, 2009. 574 p.

ZUUR, A. F.; IENO, E. N.; ELPHICK, C. S. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 1, p. 3-14, 2010.

**APÊNDICE 1 - LISTA ORDENADA DE ESPÉCIES ARBÓREAS AMOSTRADAS
POR FORMAÇÃO FLORESTAL PARA GERAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE
ESTIMATIVA DA ALTURA TOTAL, VOLUME DO FUSTE E VOLUME TOTAL.**

Nome científico	Fuste				Total			
	FES	FOD	RES	Σ	FES	FOD	RES	Σ
<i>Pseudopiptadenia contorta</i> (DC.) G.P.Lewis & M.P.Lima	21	25	8	54	8	7	2	17
<i>Astronium graveolens</i> Jacq.	17	18	18	53	4	7	5	16
<i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel) J.F.Macbr.	28	23	-	51	6	6	-	12
<i>Miconia cinnamomifolia</i> (DC.) Naudin	22	28	-	50	8	8	-	16
<i>Dalbergia nigra</i> (Vell.) Benth.	14	14	-	28	3	4	-	7
<i>Nectandra membranacea</i> (Sw.) Griseb.	1	24	-	25	-	3	-	3
<i>Tapirira guianensis</i> Aubl.	-	7	13	20	-	2	6	8
<i>Piptadenia gonoacantha</i> (Mart.) J.F.Macbr.	8	9	-	17	-	1	-	1
<i>Pterocarpus rohrii</i> Vahl	3	5	5	13	-	2	1	3
<i>Guarea guidonia</i> (L.) Sleumer	1	8	-	9	-	3	-	3
<i>Sparattosperma leucanthum</i> (Vell.) K.Schum.	3	6	-	9	-	2	-	2
<i>Hyeronima alchorneoides</i> Allemão	4	4	-	8	1	2	-	3
<i>Nectandra oppositifolia</i> Nees & Mart.	5	2	1	8	2	2	-	4
<i>Paratecoma peroba</i> (Record) Kuhlman	8	-	-	8	-	-	-	-
<i>Simarouba amara</i> Aubl.	1	3	4	8	-	2	1	3
<i>Garcinia gardneriana</i> (Planch. & Triana) Zappi	-	-	7	7	-	-	2	2
<i>Joannesia princeps</i> Vell.	2	-	5	7	-	-	3	3
<i>Pera glabrata</i> (Schott) Poepp. ex Baill.	-	-	7	7	-	-	1	1
<i>Aspidosperma</i> sp.	-	-	6	6	-	-	3	3
<i>Cabralea canjerana</i> (Vell.) Mart.	2	4	-	6	1	2	-	3
<i>Cupania oblongifolia</i> Mart.	-	6	-	6	-	1	-	1
<i>Ocotea notata</i> (Nees & Mart.) Mez	-	-	6	6	-	-	3	3
<i>Viola bicuhyba</i> (Schott) Warb.	2	4	-	6	1	-	-	1
<i>Xylopia sericea</i> A.St.-Hil.	3	2	1	6	-	-	-	-
<i>Albizia polycephala</i> (Benth.) Killip	3	2	-	5	1	1	-	2
<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	1	4	-	5	-	1	-	1
<i>Cedrela odorata</i> L.	-	5	-	5	-	3	-	3
<i>Tachigali multijuga</i> Benth.	1	4	-	5	1	2	-	3
<i>Alchornea</i> cf. <i>sidifolia</i> Müll.Arg.	1	3	-	4	-	-	-	-
<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brenan	4	-	-	4	1	1	-	2
<i>Astronium glaziovii</i> Mattick	-	4	-	4	-	1	-	1
<i>Cariniana legalis</i> (Mart.) Kuntze	1	3	-	4	1	1	-	2
<i>Clethra scabra</i> Pers.	-	4	-	4	-	2	-	2
<i>Cupania emarginata</i> Cambess.	-	-	4	4	-	-	3	3
<i>Erythroxylum pulchrum</i> A.St.-Hil.	-	1	3	4	-	-	1	1
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	3	1	-	4	-	-	-	-
<i>Lecythis pisonis</i> Cambess.	2	2	-	4	1	-	-	1
<i>Metrodorea nigra</i> A. St.-Hil.	4	-	-	4	2	-	-	2
<i>Mimosa artemisiana</i> Heringer & Paula	4	-	-	4	-	-	-	-
<i>Nectandra</i> sp.1	-	4	-	4	-	1	-	1
<i>Tetrorchidium rubrivenium</i> Poepp.	2	2	-	4	-	-	-	-
<i>Acosmium lentiscifolium</i> Schott	3	-	-	3	2	-	-	2
<i>Basioxylon brasiliensis</i> (Allemão) K. Schum.	3	-	-	3	-	-	-	-

Nome científico	Fuste				Total			
	FES	FOD	RES	Σ	FES	FOD	RES	Σ
<i>Byrsonima sericea</i> DC.	-	-	3	3	-	-	-	-
<i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.	-	-	3	3	-	-	-	-
<i>Casearia sylvestris</i> Sw.	2	1	-	3	1	-	-	1
<i>Cordia trichotoma</i> (Vell.) Arráb. ex Steud.	1	2	-	3	-	-	-	-
<i>Luehea grandiflora</i> Mart.	3	-	-	3	2	-	-	2
<i>Mabea fistulifera</i> Mart.	3	-	-	3	-	1	-	1
<i>Machaerium nyctitans</i> (Vell.) Benth.	3	-	-	3	2	-	-	2
<i>Maprounea guianensis</i> Aubl.	2	1	-	3	1	-	-	1
<i>Myrcia splendens</i> (Sw.) DC.	3	-	-	3	3	-	-	3
<i>Nectandra</i> sp.2	3	-	-	3	1	-	-	1
<i>Plathymenia reticulata</i> Benth.	1	2	-	3	-	1	-	1
<i>Platycyamus regnellii</i> Benth.	-	3	-	3	-	1	-	1
<i>Platypodium elegans</i> Vogel	3	-	-	3	1	-	-	1
<i>Sapium glandulosum</i> (L.) Morong	-	-	3	3	-	-	-	-
<i>Schizolobium parahyba</i> (Vell.) Blake	-	3	-	3	-	-	-	-
<i>Symphonia globulifera</i> L.f.	-	-	3	3	-	-	-	-
<i>Tabernaemontana</i> sp.	1	-	2	3	-	-	1	1
<i>Tibouchina granulosa</i> (Desr.) Cogn.	-	3	-	3	-	1	-	1
<i>Anadenanthera colubrina</i> var. <i>cebil</i> (Griseb.) Altschul	-	2	-	2	-	1	-	1
<i>Annona cacans</i> Warm.	-	2	-	2	-	-	-	-
<i>Cordia sellowiana</i> Cham.	-	2	-	2	-	-	-	-
<i>Ficus insipida</i> Willd.	-	2	-	2	-	1	-	1
<i>Myrcia</i> sp.	2	-	-	2	1	-	-	1
<i>Ormosia arborea</i> (Vell.) Harms	-	-	2	2	-	-	1	1
<i>Persea</i> sp.	-	-	2	2	-	-	1	1
<i>Tachigali rugosa</i> (Mart. ex Benth.) Zarucchi & Pipoly	2	-	-	2	2	-	-	2
<i>Zeyheria tuberculosa</i> (Vell.) Bureau ex Verl.	-	2	-	2	-	2	-	2
<i>Aniba firmula</i> (Nees & Mart.) Mez	-	1	-	1	-	-	-	-
<i>Annona dolabripetala</i> Raddi	1	-	-	1	-	-	-	-
<i>Balfourodendron riedelianum</i> (Engl.) Engl.	1	-	-	1	-	-	-	-
<i>Cariniana estrellensis</i> (Raddi) Kuntze	-	1	-	1	-	1	-	1
<i>Coussapoa microcarpa</i> (Schott) Rizzini	-	-	1	1	-	-	1	1
<i>Erythroxylum</i> cf. <i>cuspidifolium</i> Mart.	-	1	-	1	-	-	-	-
<i>Guatteria australis</i> A.St.-Hil.	1	-	-	1	-	-	-	-
<i>Ocotea</i> sp.1	-	1	-	1	-	-	-	-
<i>Mabea piriri</i> Aubl.	-	1	-	1	-	-	-	-
<i>Machaerium</i> sp.	-	1	-	1	-	1	-	1
<i>Moquiniastrium polymorphum</i> (Less.) G. Sancho	-	1	-	1	-	1	-	1
<i>Piptadenia paniculata</i> Benth.	-	1	-	1	-	-	-	-
<i>Pouteria</i> sp.	-	-	1	1	-	-	1	1
<i>Protium heptaphyllum</i> (Aubl.) Marchand	-	-	1	1	-	-	-	-
<i>Trichilia lepidota</i> Mart.	-	-	1	1	-	-	1	1
Total	209	264	110	583	57	78	37	172

**APÊNDICE 2 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS E SUFICIÊNCIA AMOSTRAL
PARA AS VARIÁVEIS ALOMÉTRICAS USADAS NA MODELAGEM DO
VOLUME.**

Dados	Tipologia	Diâmetro (cm)		Altura (m)		Volume (m³)		Suficiência amostral	
		média	desvio	média	desvio	média	desvio	Ncalc	Nreal
Fuste	Todas	25,04	7,16	9,68	2,56	0,41	0,27	45	583
	Floresta Estacional	25,55	6,59	10,41	2,63	0,45	0,28	49	209
	Floresta Ombrófila	26,18	8,17	10,11	2,44	0,46	0,31	46	254
	Restinga	21,30	4,89	7,23	1,61	0,23	0,12	8	110
Total	Todas	23,78	5,20	16,62	3,44	0,48	0,27	41	172
	Floresta Estacional	24,86	4,93	17,03	3,00	0,55	0,29	44	57
	Floresta Ombrófila	25,04	5,50	17,99	3,54	0,54	0,28	43	78
	Restinga	19,47	3,13	13,10	2,10	0,26	0,12	7	37

APÊNDICE 3 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS E SUFICIÊNCIA AMOSTRAL DAS VARIÁVEIS ALOMÉTRICAS USADAS PARA TESTAR O EFEITO DO AMBIENTE NA ALOMETRIA DAS ÁRVORES.

Variável	Média	Desvio	Ncalc	Nreal	Correlação	Tipo
Altura Total (m)	17,33	4,62	92		0,725	
Espessura da Casca (cm)	0,71	0,34	87	572	0,361	Resposta
Volume do Fuste (m ³)	0,41	0,41	45		0,903	
Diâmetro (cm)	25,03	9,30	-		-	Independente

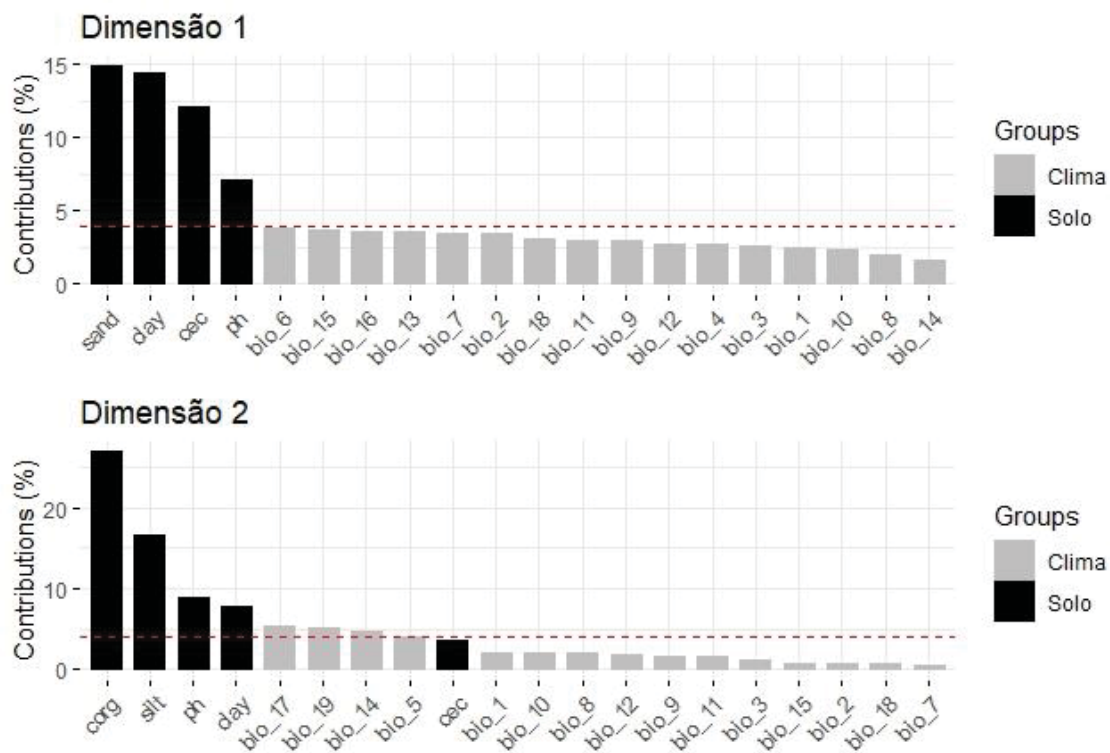
Ncalc= número de amostras suficientes para estabilidade da amostragem e Nreal= número de amostras coletadas.

APÊNDICE 4 - EFEITO DA EXCLUSÃO DE OUTLIERS, SOBRE AS EQUAÇÕES SELECIONADAS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME DAS ÁRVORES NAS TIPOLOGIAS FLORESTAIS DA MATA ATLÂNTICA, NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO.

Volume	Dados	Modelo	Outlier	SEE	SEE%	R²aj.	AIC
Fuste	Genérico	4	Com	0,061	14,81	0,978	-1599
		4	Sem	0,059	14,39	0,979	-1616
	FES	4	Com	0,063	14,16	0,979	-557
		4	Sem	0,063	14,12	0,979	-546
	FOD	4	Com	0,067	14,45	0,976	-673
		4	Sem	0,067	14,23	0,977	-666
	RES	4	Com	0,021	9,37	0,988	-529
		4	Sem	0,020	8,65	0,990	-526
	Genérico	3	Com	0,098	20,30	0,942	-306
		3	Sem	0,095	19,56	0,947	-312
	FES	3	Com	0,108	19,52	0,938	-89
		3	Sem	0,098	17,87	0,95	-96
Total	FOD	3	Com	0,101	18,77	0,945	-132
		3	Sem	0,100	18,32	0,949	-127
	RES	3	Com	0,046	17,45	0,926	-119
		3	Sem	0,043	16,59	0,935	-120

SEE= erro padrão da estimativa, R²aj.= coeficiente de determinação ajustado, AIC= critério de informação de Akaike

APÊNDICE 5 – CONTRIBUIÇÃO RELATIVA DE CADA COVARIÁVEL CLIMÁTICA E EDÁFICA PARA A DEFINIÇÃO DAS DIMENSÕES E EXPLICAÇÃO DA VARIABILIDADE AMBIENTAL. SÃO APRESENTADAS APENAS AS VINTE COVARIÁVEIS MAIS IMPORTANTES EM CONTRIBUIÇÃO.



FONTE: O autor (2020).

ANEXO 1 - DESCRIÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM UTILIZADOS PARA A CUBAGEM E MENSURAÇÃO DAS ÁRVORES, NAS FORMAÇÕES FLORESTAIS DA MATA ATLÂNTICA NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO.

Local de Coleta	Categoria	Tipologia	Altitude média	Localização		
				Fuso	X (UTM)	Y (UTM)
Área de Preservação Ambiental - Ventania 1	UC - Municipal	FES	508	23S	790148,3	7637503,4
Área de Preservação Ambiental - Ventania 2	UC - Municipal	FES	522	23S	790234,7	7637633,9
Área de Preservação Ambiental - Macaé de Cima	UC - Municipal	FOD	650	23S	775414,7	7526422,1
Área de Preservação Ambiental - Maricá	UC - Municipal	RES	18	23S	716597,2	7459200,4
Área de Preservação Ambiental - Rio Paraíba do Sul	UC - Municipal	FES	465	23S	574739,7	7516948,7
Assentamento INCRA - Município de São Fidélis	Particular	FES	43	24S	242012,8	7609169,0
Condomínio - Porto Belo	Particular	FOD	128	23S	596226,9	7466778,4
Estação Ecológica Estadual de Guaxindiba	UC - Estadual	FES	33	24S	283792,1	7634884,6
Horto Florestal Municipal de Santa Maria Madalena	Particular	FOD	598	23S	808251,9	7569399,3
Parque Estadual Costa do Sol	UC - Estadual	RES	10	23S	786309,9	7460572,7
Parque Estadual do Cunhambebe	UC - Estadual	FOD	86	23S	602171,8	7464144,0
Parque Estadual do Desengano	UC - Estadual	FOD	714	24S	195045,7	7569508,4
Parque Estadual Mico Leão Dourado	UC - Estadual	RES	11	23S	807316,0	7498756,8
Parque Estadual Serra da Concórdia	UC - Estadual	FES	680	23S	618628,4	7529687,9
Parque Estadual Três Picos - Núcleo Jequitibá	UC - Estadual	FOD	406	23S	746023,0	7519058,7
Parque Estadual Três Picos - Núcleo Paraíso	UC - Estadual	FOD	90	23S	714631,8	7511719,8
Parque Municipal Ingá	UC - Municipal	FES	442	23S	594325,7	7517219,4
Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba	UC - Federal	RES	11	24S	225780,6	7536045,8
Refúgio da Vida Silvestre - Chauá	UC - Particular	FES	426	24S	202069,6	7619969,0
Reserva Biológica da União - Núcleo 1	UC - Federal	FOD	44	23S	806998,5	7520011,7
Reserva Biológica da União - Núcleo 2	UC - Federal	FOD	40	23S	804647,2	7516554,9
Reserva Ecológica do Guapiaçu	Particular	FOD	293	23S	725118,5	7518930,3
Reserva Legal - Ingaíba x Batatal	Particular	FOD	189	23S	586908,0	7461242,9
Reserva Legal - Município de Rio das Flores	Particular	FES	618	23S	656589,8	7554106,3
Reserva Legal - Município de Varre Sai	Particular	FES	792	24S	197880,8	7682980,5
Reserva Legal - Município de Resende	Particular	FES	505	23S	562463,2	7525787,1
Reserva Legal - Município de Resende	Particular	FES	506	23S	562330,8	7525752,7
Reserva Particular do Patrimônio Natural - Rio das Pedras	UC - Particular	FOD	77	23S	591883,4	7457359,9
Reserva Particular do Patrimônio Natural - Valério Cardoso	UC - Particular	FES	479	24S	179196,2	7681443,9
Zona de Amortecimento P.E. Concordia - Ipiabas	Particular	FES	762	23S	616628,4	7526569,2
Zona de Amortecimento PARNA Itatiaia - Penedo	Particular	FOD	732	23S	546152,9	7521733,7

UC= Unidade de Conservação, FES= Floresta Estacional Semidecidual, FOD= Floresta Ombrófila Densa, RES= Restinga Florestada.